华 章 数 学 译 丛

9



Mathematical Modeling (Second Edition)

数学建模方法与分析

（原书第2版）

（新西兰）Mark M. Meerschaert 著

刘来福 杨淳 黄海洋 译



机械工业出版社
China Machine Press

（原书第2版）

数学建模方法与分析

本书提出了一种通用的数学建模方法（即“五步方法”），帮助读者迅速掌握数学建模的真谛。作者以引人入胜的方式描述了数学模型的3个主要领域：最优化、动态系统和随机过程。本书以实用的方法解决各式各样的现实问题，包括空间飞船的对接、传染病的增长率和野生生物的管理等。根据需要详细介绍了解决问题所需要的数学知识。

- 素材实例广泛
- 结合使用计算机软件作为工具
- 提供离散建模的题材，包括整数规划
- 广泛地探讨了混沌和分形
- 附加了线性规划的资料，包括电子表格工具的使用

作 者 简 介



Mark M. Meerschaert 是新西兰达尼丁Otago大学数学与统计学系应用数学部主任，以及分形演算项目的活跃成员。他还是内华达大学物理系的教授，以及大气科学研究生计划和水文科学研究生计划的参与者。Meerschaert教授具有在数学建模、概率、统计学、运筹学、偏微分方程、地下水及地表水水文学与统计物理学领域的执教经历。他当前的研究方向包括异常扩散、连续时间随机游动、分数次导数和分数次偏微分方程、地下水流及输运、金融数学中的厚尾模型、用厚尾模型及周期协方差结构建模河水流、无限方差概率模型的极限定理及参数估计。

“本书条理清晰，推理严密。练习题非常好，例题也非常出色。说实话，我还从未考虑在我的课上使用其他教材。”

——Blaise Morton，明尼苏达大学

“这是一本很好的数学建模教科书，作者对本科生数学建模课程的教学方法非常接近我本人的看法。”

——W. George Cochran，路易斯安那大学

Mathematical Modeling

(Second Edition)





华章图书

华章网站 http://www.hzbook.com
网上购书 www.china-pub.com
投稿热线：(010) 88379604
购书热线：(010) 68995259，68995264
读者信箱：hzjsj@hzbook.com
ISBN 7-111-16440-7/O・426
定价：33.00 元

华 章 数 学 译 丛

9

Mathematical Modeling

(Second Edition)

数学建模方法与分析

（原书第2版）

（新西兰）Mark M. Meerschaert 著

刘来福 杨淳 黄海洋 译


机械工业出版社
China Machine Press

本书系统介绍数学建模的理论及应用，作者将数学建模的过程归结为五个步骤（即“五步方法”），并贯穿全书各类问题的分析和讨论中．阐述了如何使用数学模型来解决实际问题．提出了在组建数学模型并且进行分析得到结论之后如何进行模型的灵敏性和稳健性的分析．将数学建模方法与计算机使用密切结合，不仅通过对每个问题的讨论给予很好的示范，而且配备了大量的习题训练．本书适合作为高等院校相关课程的教材和参考书，也可供参加国内外数学建模竞赛的人员参考，以及数学应用相关的专业人员参考．

本书版权登记号：图字：01-2004-2087

图书在版编目（CIP）数据

数学建模方法与分析（原书第2版）/（新西兰）米尔斯切特（Meerschaert, M. M.）著；刘来福等译．—北京：机械工业出版社，2005.6
（华章数学译丛）
书名原文：Mathematical Modeling, Second Edition
ISBN 7-111-16440-7

Ⅰ．数…　Ⅱ．①米…②刘…　Ⅲ．数学建模方法与分析—高等学校—教材　Ⅳ．O22

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 030413 号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街22号　邮政编码　100037）
责任编辑：隋　曦　索津莉
北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2005年6月第1版第1次印刷
787mm×1092mm 1/16・16.75 印张
印数：0 001-4000 册
定价：33.00 元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换
本社购书热线：（010）68326294

译者简介

刘来福 北京师范大学数学科学学院教授，博士生导师．北京数学会副理事长，全国大学生数学建模竞赛北京赛区组织委员会副主任．从事应用数学方面的教学和科学研究工作．著有《作物数量遗传》、《生物统计》、《数学模型与数学建模》、《问题解决的数学模型方法》等书．译著：《用 Maple 和 Matlab 解决科学计算问题》（W. Gander）．在国内外发表研究论文 80 余篇．

黄海洋 北京师范大学数学科学学院教授，博士生导师．北京师范大学数学科学学院副院长，全国大学生数学建模竞赛北京赛区组织委员会副秘书长．从事基础数学和应用数学方面的教学和科学研究工作．译著：《用 Maple 和 Matlab 解决科学计算问题》（W. Gander）．在国内外发表研究论文 30 余篇．

杨　淳 北京师范大学数学科学学院副教授．从事计算数学和应用数学方面的教学和科学研究工作．在国内外发表研究论文 40 余篇．

第 2 版前言

这本教材的第 2 版反映了若干学生和教师很有见解的批评和建议，最显著的变化是增加了广泛提议的两个新的小节．在第 3 章“最优化计算方法”增加了关于离散最优化的新的一节，这里我们给出了整数规划的分支定界方法的实用的介绍，我们还探讨了线性规划和整数规划之间的联系，这样较早地引入了对连续模型离散化的重要的设想．在第 6 章“动态模型的模拟”增加了关于混沌和分形的新的一节．我们应用分析和模拟两种方法探讨了离散的和连续的动态系统的特性，以便理解在确定的条件下它们如何变成混沌，这一节为此课题提供了一个实际的易于理解的介绍．学生获得了关于对初始条件的敏感依赖性、周期加倍和奇怪吸引子，也就是分形集等概念的体验．最重要的是，在研究这些实际问题中，不断增加了学生对数学的兴趣．

第 2 版还反映了当前技术的进步，包括了计算机代数系统 MAPLE 和 MATHEMATICA 的最新的版本的应用．在第 3 章介绍了电子表格的线性和整数规划求解软件，以及流行的线性规划软件包 LINDO 产品．所有的计算机图像和适当应用技术的讨论都已更新．在本书中涉及的算法在不同平台上的计算机实现，以及本书包括的所有图像和计算结果的计算机文件可以从作者那里获得．

我们很高兴读者对第 1 版提出了众多反馈意见，我们最希望听到使用这本书的学生与教师的意见．请别客气，随时向我提出任何批评和建议．

Mark M. Meerschaert
数学系
内华达大学
Reno，NV 89557-0045

电话：(702) 784-6077
传真：(702) 784-1478
Email：mcubed@unr. edu
http：//unr. edu/homepage/mcubed/

第 1 版前言

这本书是为数学专业及相关专业大学高年级的学生或刚入学的研究生提供的一本数学建模领域的入门读物. 大学数学中一、二年级通常掌握的一元微积分、多元微积分、线性代数和微分方程是必需的. 优先接触过计算、概率和统计是有用的，但不是阅读本书的前提.

本书与某些专注于某一类数学模型的教科书不同，覆盖了从最优化到动态系统到随机过程中有关建模问题的广泛领域. 本书也与另外一些仅仅要求掌握微积分知识的书籍不同，它将鼓励学生使用他们所学的全部的数学知识来解决问题(因为这些都是解决实际问题时需要的).

占绝对优势的数学模型可以归于如下的三大类：最优化模型、动态模型和概率模型. 在实际应用中模型的类型可能由所遇到的问题决定，但更多的是与使用者对模型的选择有关. 在许多实例中都可以使用若干不同类型的模型. 例如：一个大规模的蒙特卡罗模拟模型也可能会与一个小的易于处理的基于期望值的确定性模型结合起来使用.

与数学模型的三个主要类别相对应，本书也分为三个部分. 我们从最优化模型开始. 第 1 章的第一节在一个变量的最优化问题的内容中介绍了数学建模的五步方法. 在这一章的其余部分还介绍了灵敏性分析和稳健性分析. 全书贯穿使用了这些数学建模的基本原理. 每一章后面的习题也要求学生掌握. 第 2 章，关于多变量最优化，我们介绍了决策变量、可行解、最优解和约束条件. 在这一章介绍的拉格朗日乘数法主要是为了在多元微积分中没有接触过这一重要的技术的学生. 在关于问题对于约束条件的灵敏性分析的这一节，我们会了解到拉格朗日乘子可用来表示影子价格（有些作者称它为对偶变量). 这些被放在第 3 章稍后的关于线性规划的讨论当中. 第 3 章包含了一些重要的计算技术，包括单个和多个变量的牛顿法和线性规划.

这本书的第二部分是关于动态模型的，介绍状态和平衡态的概念. 随后的关于状态空间、状态变量和随机过程的平衡态的讨论都与这些概念密切相关. 还讨论了离散和连续时间的非线性动态系统. 在书中的这一部分很少强调严格的解析解，因为许多这类模型容许非解析解.

在书的最后一部分我们介绍了概率模型. 学习这部分内容不需要事先了解概率的知识，我们在本书前两部分的基础上进行讲解，以自然和直观的方式介绍实际问题中有关概率的概念.

这本书的每一章都配有挑战性的习题. 这些习题不但要求学生付出巨大的努力还需要一定的创造性. 书中的问题不是编造的，它们都是现实问题. 这些问题

没有被设计去阐明特定数学技术的应用，相反，由于问题的需要，书中有时将会偶尔使用某些新的数学技术．我决定在书中不安排任何内容使学生产生疑问："这个内容是干什么用的?"尽管虚构的问题过于典型化、过分简化或严重不实际，但是虚构的问题还是包含了应用数学去解决实际问题时的基本的挑战．对于许多学生来说，虚构的问题提供了足够的挑战．这本书教授了学生如何去解决这些虚构的问题．本书提供了一种通用方法，可以使得有能力的学生成功地运用它去解决这些虚构的问题，它出现在第 1 章的第 1 节．这个方法同样可用于全书所有类型的问题．

每一章的习题的后面列出了建议的进一步阅读的参考文献．其中包括了若干与该章内容有关的应用数学的 UMAP 模块．UMAP 模块能够提供对本书材料的有价值的补充．所有的 UMAP 模块可以从 COMAP 公司得到（COMAP Inc.，57 Bedford St.，Suite 210，Lexington MA，02173；电话为 1-800-772-6627；电子邮件为 order@comap. com；网址为 http：//www. comap. com).

本书的主要论题之一是使用适当的技术去解决数学问题．计算机代数系统、图像和数值方法都是数学工具，许多学生还没有接触到这些工具．我们把当代新技术引入了本书，因为这些新技术更加便于解决现实世界中的问题，从而激励学生去学习它．计算机代数系统和二维图形在全书都会用到，第 2、3 章关于多元最优化的问题涉及三维图形，接触过三维图形的学生可以尝试使用已掌握的知识．课文中的数值方法包括牛顿方法、线性规划、欧拉方法和线性回归．

书中除了介绍绘图工具在数学中的恰当使用之外，还包括大量用计算机绘制的图形．计算机代数系统广泛地用于明显地需要代数计算的那些章节．本书第 2、4、5 章包含了从计算机代数系统 MAPLE 和 MATHEMATICA 得到的实际的计算机输出．关于计算技术的章节（第 3、6、9 章）讨论了对于求解允许非解析解的问题时数值算法的恰当使用．关于线性规划的第 3.3 节中包括了从流行的线性规划软件包 LINDO 得到的实际的计算机输出．关于线性回归的第 8.3 节包括了从通用的统计软件包 MINITAB 得到的输出．

学生需要具备这些专用的技术以便他们充分地利用本书．我尽量方便各种教师使用这本书．有些人有办法使学生接触这些复杂的计算工具，但有些人办法较少．最起码的需要包括：(1) 绘制二维图形的工具，(2) 一台能使学生执行简单的数值算法的计算机．计算机电子表格软件或者可编程的图形计算器都可以做这些事情．理想的状况是为学生提供机会接触较好的计算机代数系统、线性规划软件包和统计计算软件包．下面提供了关于最流行的计算机软件包的信息，对于那些没有接触过这些专门软件的学生和教师来说是有帮助的．

本书中的数值算法是以伪代码的形式表示的．有些教师喜欢让学生自己实现这些算法．另一方面，如果不打算要求学生去编写程序，我们希望教师很方便地提供给学生适当的软件．本书中所有的算法都在各种计算机的平台上实现过，对

于本书的使用者非常方便，无须附加的费用．如果你想得到这些算法的拷贝，请与作者联系．同样，如果你愿意与另外的教师和学生共享你自己的算法，请送一份你的拷贝给我．如过你允许的话，我将免费将它拷贝给其他的人．

数学建模是连接数学和现实世界的桥梁．从提出问题，思考、优化这个问题，到用精确的数学语言叙述这个问题．一旦问题变成数学问题，就可以使用数学去求得解答．最后，需要倒转这个过程，把数学的解答翻译成对于原问题来说是易于了解的、有意义的答案．（这是很多人经常忽略的部分．）有些人擅长语言，而另一些人则擅长计算，我们需要具备两种能力的人．我们需要更多的人既擅长语言又擅长计算，并且愿意和能够进行翻译．这些人就是将来解决问题的有影响力的人．

软件

下面是与本书内容有关的相关软件包的部分清单．

计算机代数系统

DERIVE，Soft Warehouse，Inc.，http：//www. derive. com

MAPLE，Waterloo Maple，Inc.，http：//www. maplesoft. com

MATHCAD，Mathsoft，Inc.，1-800-628-4223，http：//www. mathsoft. com

MATHEMATICA，Wolfram Research，Inc.，http：//www. mathematica. com

MATLAB，The Math Works，Inc.，http：//www. mathworks. com

统计软件包

MINITAB，Minitab，Inc.，1-800-322-1377，http：//www. minitab. com

SAS，SAS Institute，Inc.，http：//www. sas. com

SPSS，SPSS Inc.，http：//www. spss. com

线性规划软件包

LINDO，The Scientific Press，1-800-451-5409，http：//www. lindo. com

MPL，Maximal Software，Inc.，http：//www. maximal-usa. com

AMPL，Compass Modeling Solutions，Inc.，http：/www. modeling. com

致谢

我很感谢 Academic Press 的 Chuck Glaser、Joe Clifford、Cindy Kogut 和 Nancy Priest 对本书第 1 版所做的工作，Robert Ross、Amy Fulton、Linda Ratts Engelman 和 Vanessa Gerhard 对第 2 版所做的工作．还要感谢 Annie Todd 向 Academic Press 推荐这本书，我的秘书 Diane Hines 出色的打印，以及所有提出有见解意见的读者．感谢 Peter Cherry 和在 Vector Research，Inc. 的所有人、

Steve Wheatcraft 和 Wallace Whiting 以及他们在 Reno 的内华达大学 Mines 的 Mackay 学校的学生，他们教我实际问题. 感谢 Ron Fryxell、Chaitan Gupta，以及我的所有在 Albion 学院和在 Reno 的内华达大学的同事，在我努力进行实际问题的教学中给予的大力支持. 特别是，感谢我的学生踊跃地参加课堂实践，最终形成这本书，本书的成功，大部分归功于他们.

目　录

译者简介

第 2 版前言

第 1 版前言

第一部分　最优化模型

第 1 章　单变量最优化 …… 3

1.1　五步方法 …… 3

1.2　灵敏性分析 …… 7

1.3　稳定性与稳健性 …… 11

1.4　习题 …… 12

1.5　进一步的阅读文献 …… 14

第 2 章　多变量最优化 …… 15

2.1　无约束最优化 …… 15

2.2　拉格朗日乘子 …… 24

2.3　灵敏性分析与影子价格 …… 31

2.4　习题 …… 38

2.5　进一步的阅读文献 …… 42

第 3 章　最优化计算方法 …… 43

3.1　单变量最优化 …… 43

3.2　多变量最优化 …… 50

3.3　线性规划 …… 58

3.4　离散最优化 …… 72

3.5　习题 …… 82

3.6　进一步的阅读文献 …… 89

第二部分　动态模型

第 4 章　动态模型介绍 …… 93

4.1　常态分析 …… 93

4.2　动力系统 …… 97

4.3　离散时间的动力系统 …… 102

4.4　习题 …… 108

4.5　进一步的阅读文献 …… 111

第 5 章　动态模型分析 …… 112

5.1　特征值方法 …… 112

5.2　对离散系统的特征值方法 …… 117

5.3　相图 …… 121

5.4　习题 …… 133

5.5　进一步的阅读文献 …… 137

第 6 章　动态模型的模拟 …… 138

6.1　模拟简介 …… 138

6.2　连续时间模型 …… 143

6.3　欧拉方法 …… 150

6.4　混沌与分形 …… 156

6.5　练习 …… 167

6.6　进一步的阅读文献 …… 176

第三部分　概率模型

第 7 章　概率模型简介 …… 181

7.1　离散概率模型简介 …… 181

7.2　连续概率模型简介 …… 184

7.3　统计简介 …… 187

7.4　习题 …… 191

7.5　进一步的阅读文献 …… 196

第 8 章　随机模型 …… 197

8.1　马尔可夫链 …… 197

8.2　马尔可夫过程 …… 205

8.3　线性回归 …… 213

8.4　习题 …… 220

8.5　进一步的阅读文献 …… 226

第 9 章　概率模型的模拟 …… 227

9.1　蒙特卡罗模拟 …… 227

9.2　马尔可夫性质 …… 232

9.3　解析模拟 …… 239

9.4　习题 …… 245

9.5　进一步的阅读文献 …… 249

后记 …… 250

索引 …… 253

第一部分　最优化模型

解决最优化问题是数学的一些最为常见的应用. 无论我们进行何种工作，我们总是希望达到最好的结果，而使不好的方面或消耗等降到最低. 企业管理人员试图通过对一些变量的控制使收益达到最大，或在达到某一预期目标的前提下使成本最低. 经营渔业及林业等可更新资源的管理者要通过控制产量以达到长期效益的最大化；政府机构需要建立一些标准，使生产生活消费品的环境成本降到最低；计算机的系统管理员要使计算机的处理能力达最大，而使作业的延迟最少；农民会尽量调整种植空间从而使收获最高；医生则要合理使用药物使其副作用降到最低. 这些以及许多其他的应用都有一个共同的数学模式：有一个或多个可以控制的变量，它们通常要受一些实际中的限制，通过对这些变量的控制，从而使某个目标达到最优. 最优化模型正是要给定问题的约束条件，确定受约束的可控变量的取值，以达到最优结果.

第1章 单变量最优化

我们对最优化模型的讨论从单变量优化问题开始. 大多数学生对此已经有了一些实际的经验. 单变量优化问题又称极大-极小化问题，通常在大学第一学期的微积分课程中已有介绍. 很多方面的实际应用问题仅用这些方法就可以处理. 本章的目的一方面是对这些基本方法进行回顾，另一方面是介绍数学模型的常见形式等基础知识.

1.1 五步方法

本节概要地介绍用数学模型解决问题的一般过程，我们称之为五步方法. 我们以解决一个典型的单变量极大-极小化问题为例来介绍这个过程. 这类问题大多数学生在第一学期的微积分课程中都是接触过的.

例 1.1 一头猪重 200 磅[⊖]，每天增重 5 磅，饲养每天需花费 45 美分. 猪的市场价格为每磅 65 美分，但每天下降 1%，求出售猪的最佳时间.

解决问题的数学模型方法包括五个步骤：

1. 提出问题
2. 选择建模方法
3. 推导模型的数学表达式
4. 求解模型
5. 回答问题

第一步是提出问题，而问题需要用数学语言表达，这通常需要大量的工作. 在这个过程中，我们经常要根据问题的特点做一些假设. 在这里不必担心需要做出推测，因为我们总可以在后面的过程中随时返回、用更好的推测进行调整. 在我们用数学形式提出问题之前，我们要定义一些术语. 首先列出整个问题涉及的变量，包括恰当的单位，然后写出关于这些变量所做的假设，列出我们已知的或假设的这些变量之间的关系式，包括等式和不等式. 这些工作做完后，就可以提出问题了. 用明确的数学语言写出这个问题的目标的表达式，再加上前面写出的变量、单位、等式、不等式及所做假设. 就构成了完整的问题.

在例 1.1 中，全部的变量包括：猪的重量 w(磅)，从现在到出售猪期间经历的时间 t(天)，t 天内饲养猪的花费 C(美元)，猪的市场价格 p(美元/磅)，售出生猪所获得的收益 R(美元)，我们最终获得的净收益 P(美元). 这里还有一些其他的有关量，如猪的初始重量(200 磅)等，但它们不是变量. 这里把变量和参量区分开是很重要的.

下面我们要列出对步骤 1 中所确定的这些变量所做的假设. 这里考虑到了参

⊖ 1 磅＝0.454kg

量在模型中的影响．猪的重量从初始的 200 磅按每天 5 磅增加，我们有：

$$(w\ 磅) = (200\ 磅) + \left(\frac{5\ 磅}{天}\right)(t\ 天).$$

这里我们把变量的单位包括进去，从而可以检查所列式子是否有意义．
该问题中涉及到的其他假设包括：

$$\left(\frac{p\ 美元}{磅}\right) = \left(\frac{0.65\ 美元}{磅}\right) - \left(\frac{0.01\ 美元}{磅 \cdot 天}\right)(t\ 天)$$

$$(C\ 美元) = \left(\frac{0.45\ 美元}{天}\right)(t\ 天)$$

$$(R\ 美元) = \left(\frac{p\ 美元}{磅}\right)(w\ 磅)$$

4

$$(P\ 美元) = (R\ 美元) - (C\ 美元).$$

我们还要假设 $t \geqslant 0$，在这个问题中，我们的目标是求净收益 P 的最大值．图 1-1 对第一步所得的结果进行了归纳，以便于后面参考．

变量：
- t＝时间（天）
- w＝猪的重量（磅）
- p＝猪的价格（美元/磅）
- C＝饲养 t 天的花费（美元）
- R＝售出猪的收益（美元）
- P＝净收益（美元）

假设：
- $w = 200 + 5t$
- $p = 0.65 - 0.01t$
- $C = 0.45t$
- $R = p \cdot w$
- $P = R - C$
- $t \geqslant 0$

目标：求 P 的最大值

图 1-1　售猪问题的第一步的结果

5

第一步中的三个阶段（变量、假设、目标）的确定不需要按特定的顺序．比如在第一步中首先确定目标常常更有帮助．在例 1.1 中，我们定义了目标 P 和列出等式 $P = R - C$ 后，才能容易看出 R 和 C 应该为变量．一个考查第一步是否完整的方法是检查 P 是否可以最终表示成变量 t 的函数．关于步骤 1 的一个最好的一般性建议就是首先写出所有显而易见的部分．（例如对有些变量，只需阅读对问题的说明，并找出其中的名词，即可得到．）随着这个过程的进行，其他部分会逐渐补充完整．

第二步是选择建模方法．现在我们已经有了一个用数学语言表述的问题，我们需要选择一个数学方法来获得解．许多问题都可以表示成一个已有有效的一般求解方法的标准形式．应用数学的多数研究，包含确定问题的一般类别，并提出解决该类问题的有效方法．在这一领域有许多的文献，并且不断取得许多新的进

展．一般很少有学生对选择较好的建模方法有经验或熟悉参考文献．在这本书里，除了极少的例外，我们都会给定所用的建模方法．我们将例 1.1 定位为单变量优化问题，或极大-极小化问题．

我们只给出所选建模方法的主要内容，细节请读者参考微积分入门教科书．

给定定义在实轴的子集 S 上的实值函数 $y=f(x)$．设 f 在 S 的某一内点 x 是可微的．若 f 在 x 达到极大或极小，则 $f'(x)=0$．这一结论由微积分中的一个定理保证．据此我们可以在求极大或极小点时不考虑那些 $x\in S$ 中 $f'(x)\neq 0$ 的内点．只要 $f'(x)=0$ 的点不太多，这个方法就很有效．

第三步是推导模型的公式．我们要把第一步得到的问题应用于第二步，写成所选建模方法需要的标准形式，以便于我们运用标准的算法过程求解．如果所选的建模方法通常采用一些特定的变量名，比如我们的这个例子，那么把我们问题中的变量名改换一下常会比较方便．我们有：

$$\begin{aligned} P &= R - C \\ &= p \cdot w - 0.45t \\ &= (0.65 - 0.01t)(200 + 5t) - 0.45t. \end{aligned}$$

记 $y=P$ 作为需最大化的目标变量，$x=t$ 作为自变量．我们的问题现在化为在集合 $S=\{x : x\geqslant 0\}$ 上求下面函数的最大值：

$$\begin{aligned} y &= f(x) \\ &= (0.65 - 0.01x)(200 + 5x) - 0.45x. \end{aligned} \tag{1}$$

第四步是利用第二步中确定的标准过程求解这个模型．在我们的例子中，我们要对(1)式中定义的 $y=f(x)$ 在区间 $x\geqslant 0$ 上求最大值．图 1-2 给出了 $f(x)$ 的曲线．由于 f 关于 x 是二次的，因此这是一条抛物线．我们计算出

$$f'(x) = \frac{(8-x)}{10},$$

则在点 $x=8$ 处 $f'(x)=0$．由于 f 在区间 $(-\infty, 8)$ 上是单调上升的，而在区间 $(8, \infty)$ 是单调下降的，则点 $x=8$ 是整体最大值点．在此点我们有 $y=f(8)=133.20$．因此点 $(x, y)=(8\ 133.20)$ 是 f 在整个实轴上的整体最大值点，从而也是区间 $x\geqslant 0$ 上的最大值点．

6

第五步是回答开始在第一步中提出的问题：何时售猪可以达到最大的净收益．由我们的数学模型得到的答案是在 8 天之后，可以获得净收益 133.20 美元．只要第一步中提出的假设成立，这一结果就是正确的．相关的问题及其他不同的假设可以按照第一步中的做法调整得到．由于我们处理的是一个实际问题(一个农民决定何时出售他饲养的生猪)，在第一步中会有一个风险因素存在，因此通常有必要研究一些不同的可能，这一过程称为灵敏性分析，我们将在下一节中讨论．

这一节的主要目的是介绍数学建模的五步方法．图 1-3 将这一方法总结归纳

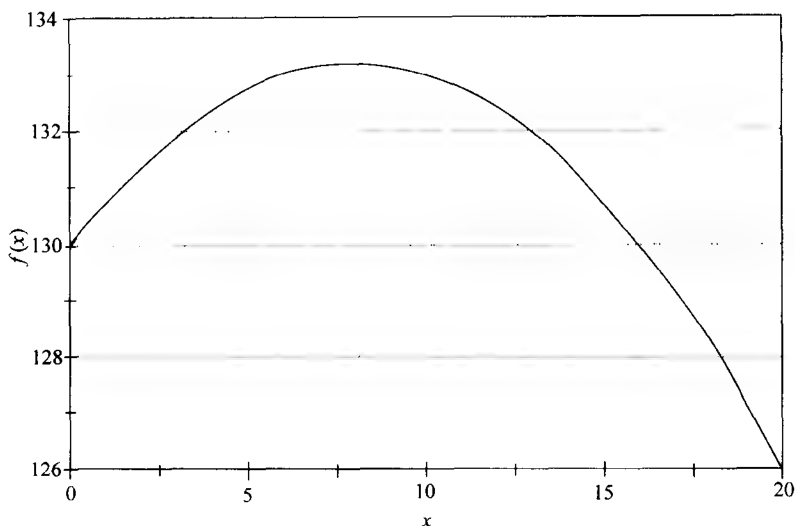


图 1-2　售猪问题的净收益 $f(x)$ 关于售猪时间 x 的曲线图

$$f(x)=(0.65-0.01x)(200+5x)-0.45x$$

第一步，提出问题.

(a) 列出问题中涉及到的变量，包括适当的单位.

(b) 注意不要混淆了变量和常量.

(c) 列出你对变量所做的全部假设，包括等式和不等式.

(d) 检查单位从而保证你的假设有意义.

(e) 用准确的数学表达式给出问题的目标.

第二步，选择建模方法.

(a) 选择解决你的问题的一个一般的求解方法.

(b) 一般地，这一步的成功需要经验、技巧和对相关文献有一定的熟悉程度.

(c) 在本书中，我们通常会给定要用的建模方法.

第三步，推导模型的公式.

(a) 将第一步中得到的问题重新表达成第二步选定的建模方法所需要的形式.

(b) 你可能需要将第一步中的一些变量名改成与第二步所用的记号一致.

(c) 记下任何补充假设，这些假设是为了使在第一步中描述的问题与第二步中选定的数学结构相适应而做出的.

第四步，求解模型.

(a) 将第二步中所选方法应用于第三步得到的表达式.

(b) 注意你的数学推导，检查是否有错误，你的答案是否有意义.

(c) 采用适当的技术. 计算机代数系统，图形，数值计算的软件等都能扩大你能解决问题的范围，并能减少计算错误.

第五步，回答问题.

(a) 用非技术性的语言将第四步的结果重新表述.

(b) 避免数学符号和术语.

(c) 能理解最初提出的问题的人就应该能理解你给出的解答.

图 1-3　五步方法

7～8

成了便于以后参考的图表形式．在本书中，我们会运用这个五步方法求解数学模型中的大量问题．第二步一般会包括对所选建模方法的描述并附带一、两个例子．已经熟悉这些建模方法的读者可以跳过这一部分或只熟悉一下其记号．图 1-3 中提到的其他内容，如适当技术的使用等，我们会在本书后面的章节中展开讨论．

每章最后的习题同样需要应用五步方法．现在养成使用五步方法的习惯，今后就会比较容易解决我们遇到的复杂的模型问题．这里对第五步要特别加以注意，在实际中，仅有结果正确是不够的，你还需要有把你的结论和其他人交流的能力，其中有些人可能并不像你一样对数学的知识有那么多的了解．

1.2　灵敏性分析

上一节概要地介绍了数学建模的五步方法．整个过程从对问题做出一些假设开始．但我们很少能保证这些假设都是完全正确的．因此我们需要考虑所得结果对每一条假设的敏感程度．这种灵敏性分析是数学建模中的一个重要方面．具体内容与所用的建模方法有关，因此关于灵敏性分析的讨论会在本书中贯穿始终．这里我们仅对简单的单变量优化问题进行灵敏性分析．

在上节中，我们用售猪问题(例 1.1)来说明数学模型的五步方法．图 1-1 列出了我们在求解该问题中所做的所有假设．在这个例子中，数据和假设都有非常详细的说明，即使这样，我们还要再严格检查．数据是由测量、观察有时甚至完全是由猜测得到的，因此我们要考虑数据不准确的可能性．

我们知道有些数据要比其他的可靠性高得多，生猪现在的重量、猪现在的价格，每天的饲养花费都很容易测量，而且有相当大的确定性．猪的生长速率则不那么确定，而价格的下降速率则确定性更低．记 r 为价格下降的速率．我们前面假设 $r=0.01$ 美元/天，现在让我们假设 r 的实际值是不同的．对几个不同的 r 值重复前面的求解过程，我们会对问题的解关于 r 的敏感程度有所了解．表 1-1 给出了选择几个不同的 r 值求出的计算结果．图 1-4 将这些数据绘制在了图上．我们可以看到售猪的最优时间对参数 r 是很敏感的．

9

表 1-1　售猪问题中最佳售猪时间 x 关于价格的下降速率 r 的灵敏性

r(美元/天)	x(天)	r(美元/天)	x(天)
0.008	15.0	0.011	5.5
0.009	11.1	0.012	3.3
0.01	8.0		

对灵敏性的更系统的分析是将 r 作为未知的参数，仍按前面的步骤求解．写出

$$p = 0.65 - rt,$$

同前面一样，得到

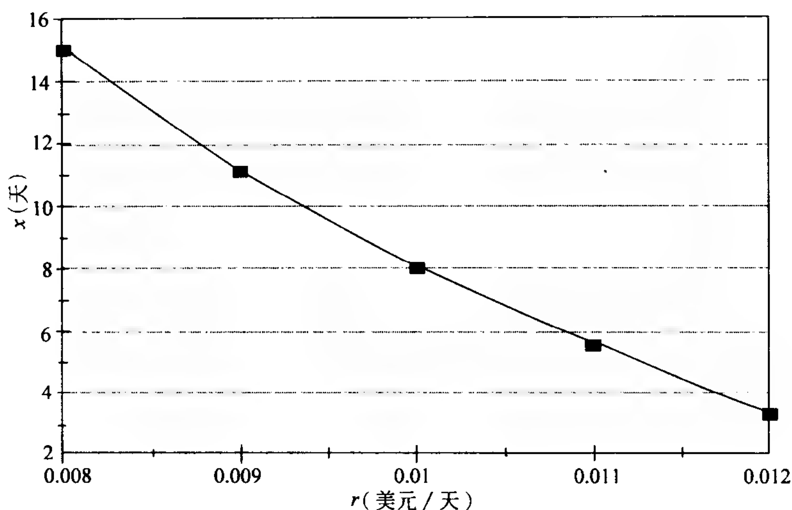


图 1-4 售猪问题中最佳售猪时间关于价格的下降速率 r 的曲线

$$
\begin{aligned}
y &= f(x) \\
&= (0.65 - rx)(200 + 5x) - 0.45x.
\end{aligned}
$$

然后计算

$$f'(x) = \frac{-2(25rx + 500r - 7)}{5}$$

使 $f'(x)=0$ 的点为

$$x = \frac{(7 - 500r)}{25r}. \tag{2}$$

这样只要 $x \geqslant 0$，即只要 $0 < r \leqslant 0.014$，最佳的售猪时间就由(2)式给出. 对 $r > 0.014$，抛物线 $y=f(x)$的最高点落在了我们求最大值的区间 $x \geqslant 0$ 之外. 在这种情况下，由于在整个区间$[0, \infty)$上都有 $f'(x)<0$，最佳的售猪时间为 $x=0$. 图 1-5 给出了 $r=0.015$ 的情况.

10

猪的生长速率 g 同样不很确定. 我们在前面假设 $g=5$ 磅/天. 一般地，我们有

$$w = 200 + gt,$$

从而有公式

$$f(x) = (0.65 - 0.01x)(200 + gx) - 0.45x,$$

于是

$$f'(x) = \frac{-[2gx + 5(49 - 13g)]}{100}.$$

这时使 $f'(x)=0$ 的点为

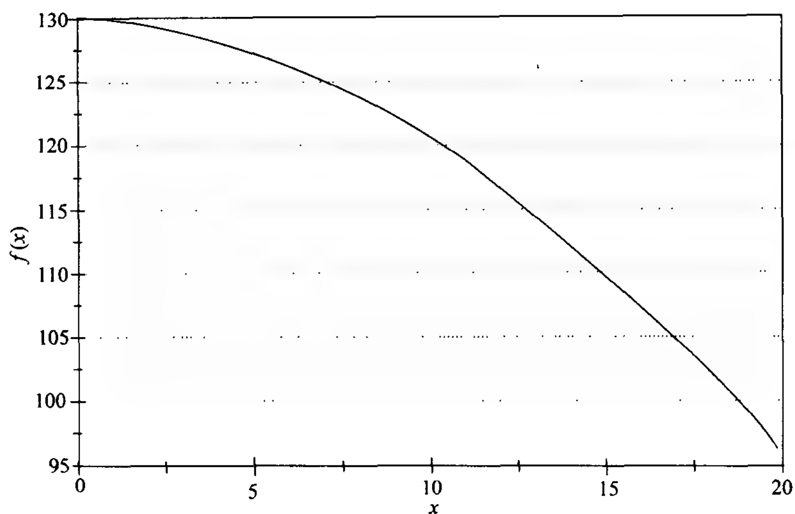


图 1-5　售猪问题的净收益 $f(x)$ 在 $r=0.015$ 时关于售猪时间 x 的曲线图
$f(x)=(0.65-0.015x)(200+5x)-0.45x$

$$x=\frac{5(13g-49)}{2g}. \tag{3}$$

只要由(3)式计算出的 x 值是非负的，最佳售猪时间就由此公式给出．图 1-6 给出了最佳售猪时间和生长速率 g 之间的关系．　11

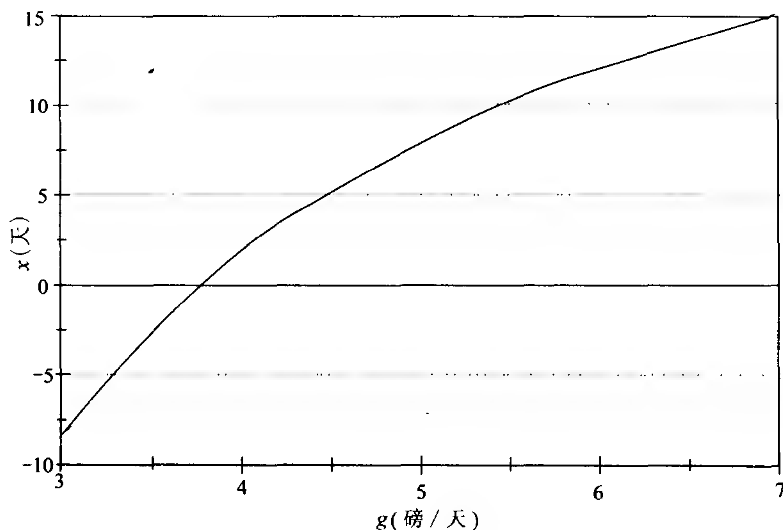


图 1-6　售猪问题中最佳售猪时间关于生长速率 g 的曲线

将灵敏性数据表示成相对改变量或百分比改变的形式，要比绝对改变量的形式更自然也更实用．例如，r 的 10%的下降导致了 x 的 39%的增加，而 g 的 10%的下降导致了 x 的 34%的下降．如果 x 改变量为 Δx，则 x 的相对改变量为 $\Delta x/x$，百分比改变量为 $100\Delta x/x$．如果 r 改变了 Δr，导致 x 有 Δx 的改变量，则相对改变量的比值为 $\Delta x/x$ 与 $\Delta r/r$ 的比值．令 $\Delta r\to 0$，按照导数的定义，我们有

$$\frac{\Delta x/x}{\Delta r/r}\to\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}r}\cdot\frac{r}{x}.$$

我们称这个极限值为 x 对 r 的灵敏性，记为 $S(x, r)$．在售猪问题中，我们在点 $r=0.01$ 得到

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}r}&=\frac{7}{25r^2}\\&=-2\,800\end{aligned}$$

[12]

因此

$$\begin{aligned}S(x,r)&=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}r}\cdot\frac{r}{x}\\&=(-2\,800)\left(\frac{0.01}{8}\right)\\&=\frac{-7}{2}.\end{aligned}$$

即若 r 增加 2%，则 x 下降 7%．由于

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}g}&=\frac{245}{2g^2}\\&=4.9,\end{aligned}$$

[13]

我们有

$$\begin{aligned}S(x,g)&=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}g}\cdot\frac{g}{x}\\&=(4.9)\left(\frac{5}{8}\right)\\&=3.062\,5,\end{aligned}$$

于是猪的生长率增加 1%，会导致要多等待 3%的时间再将猪售出．

灵敏性分析的成功应用通常要有较好的判断力，通常既不可能对模型中的每个参数都计算灵敏性系数，也没有这种特别的要求．我们需要选择那些有较大不确定性的参数进行灵敏性分析．对灵敏性系数的解释还要依赖于参数的不确定程度．原始问题中数据的不确定程度会影响我们对答案的自信度．在这个售猪问题中，我们通常认为猪的生长率 g 比价格的下降率 r 更可靠．如果我们观察了猪或其他类似动物在过去的生长情况，g 有 25%的误差会是很不寻常的，但对 r 的估计有 25%的误差则不足为奇．

1.3　稳定性与稳健性

一个数学模型称为有稳健性是指即使这个模型不完全精确，由其导出的结果仍是正确的．在实际问题中，我们不会有绝对准确的信息，即使能够建立一个完美的精确的模型，我们也可能采用较简单和易于处理的近似方法．因此，在数学模型问题中关于稳健性的研究是很有必要的一部分．

在上一节中，我们介绍了灵敏性分析的过程，这是一种根据对数据提出的假设来评估模型的稳健性的方法．在数学建模过程的第一步中，还有其他的假设需要检查．出于数学处理的方便和简化的目的，常常要做一些假设，建模者就有责任考察这些假设是否太特殊，以至使建模过程的结果变得无效． [14]

图 1-1 列出了求解售猪问题所做的全部假设．除了数据的取值外，主要的假设是猪的重量和每磅的价格都是时间的线性函数．这些显然是做了简化，不可能是严格满足的．比如，根据这些假设，从现在起的一年后，猪的重量将是

$$\begin{aligned} w &= 200 + 5(365) \\ &= 2\,025 \text{ 磅} \end{aligned}$$

而卖出所得收益为

$$\begin{aligned} p &= 0.65 - 0.01(365) \\ &= -3.00 \text{ 美元 / 磅.} \end{aligned}$$

一个更实际的模型应该既考虑到这些函数的非线性性，又考虑到随着时间推进的不确定性的增加．

如果假设是错的，模型又怎能给出正确的答案呢？虽然数学模型力求完美，但这是不可能达到的．一个更确切的说法是数学模型力求接近完美．一个好的数学模型有稳健性，是指虽然它给出的答案并不是完全精确的，但足够近似从而可以在实际问题中应用．

让我们来考察在售猪问题中的线性假设．其基本方程是：

$$P = pw - 0.45t,$$

其中 p 为以美元计的每磅的生猪价格．w 为以磅计的猪的重量．如果模型的初始数据和假设没有与实际相差太远，则售猪的最佳时间应该由令 $P'=0$ 得到．计算后有

$$p'w + pw' = 0.45$$

其中 $p'w+pw'$ 项代表猪价的增长率．模型告诉我们，只要猪价比饲养的费用增长快，就应暂不卖出，继续饲养．此外，猪的价格改变包括两项：$p'w$ 和 pw'． [15] 第一项 $p'w$ 代表因价格下降而损失的价值．第二项 pw' 代表由于猪增重而增加的价值．考虑到这个更一般的模型在应用中的实际问题，要求的数据应该包括将猪的增长和价格变化作为时间的可微函数的完全确定的具体形式．我们无法知道这些函数的准确形式，甚至它们是否有意义也是个问题．是否可以在星期天凌晨 3

点售猪？猪价是否可以是无理数？让我们来假设一种情况．一个农民有一头重量大约是 200 磅的猪，在上一周猪每天增重约 5 磅．五天前猪价为 70 美分/磅，但现在猪价下降为 65 美分/磅，我们应该怎么办？一个显而易见的方法是以这些数据($w=200$，$w'=5$，$p=0.65$，$p'=-0.01$)为依据确定何时售出，我们也正是这样做的．我们知道 p' 和 w' 在未来的几周内不会保持常数，因此 p 和 w 也不会是时间的线性函数．但是，只要 p' 和 w' 在这段时期内的变化不太大．由于假设它们是线性的而导致的误差就不会太大．

我们现在要给出上一节的灵敏性分析结果的一个更一般化的解释．回顾前面的结果，最佳售猪时间(x)对猪的生长率 w' 的改变的灵敏性为 3．假设在下几周内猪的实际生长率在每天 4.5 到 5.5 磅之间，即为预期值的 10%之内，则最佳售猪时间会在 8 天的 30%之内变化，即 5 到 11 天．而仍在第 8 天卖出所导致的收益损失不超过 1 美元．

再考虑价格．设我们认为今后几周内价格的改变为 $p'=-0.01$，即每天下降 1 美分是最糟糕的情况．价格很有可能在今后会下降很慢，甚至达到稳定($p'=0$)．我们现在能说的只是至少要等 8 天再出售．对较小的 p'(接近 0)，模型暗示我们等较长的时间再出售．但我们的模型对较长的时间不再有效．因此，解决这个问题的最好的方法是将猪再饲养一周的时间，然后重新估计 p、p'、w' 和 w，再用模型重新计算．

16

1.4　习题

1. 一个汽车制造商售出一辆某品牌的汽车可获利 1 500 美元．估计每 100 美元的折扣可以使销售额提高 15%．

   (a)多大的折扣可以使利润最高？利用五步方法及单变量优化模型．

   (b)对你所得的结果，求关于所做的 15%假设的灵敏性．分别考虑折扣量和相应的收益．

   (c)假设实际每 100 美元的折扣仅可以使销售额提高 10%，对结果会有什么影响？如果每 100 美元折扣的提高量为 10%到 15%之间的某个值，结果又如何？

   (d) 什么情况下折扣会导致利润的降低？

2. 在售猪问题中，对每天的饲养花费做灵敏性分析．分别考虑对最佳售猪时间和相应收益的影响．如果有新的饲养方式，每天的饲养花费为 60 美分，会使猪按 7 磅/天增重，那么是否值得改变饲养方式？求出使饲养方式值得改变的最小的增重率．

3. 仍考虑例 1.1 中的问题．但现在假设猪的价格保持稳定．设

$$p=0.65-0.01t+0.000\,04t^2 \tag{4}$$

表示 t 天后猪的价格(美分/磅)．

(a)画图表示(4)式及我们原来的价格函数．解释为什么原来的价格函数可以作为(4)式在 t 接近零时的近似．

(b) 求最佳的售猪时间．利用五步方法及单变量优化模型．

(c)参数 0.000 04 表示价格的平稳率．对这个参数求其灵敏性．分别考虑最佳的售猪时间和相应的收益．

(d)对(b)中的结果和例题中所得的最优解进行比较．讨论我们关于价格的假设的稳健性．

4. 一处石油泄漏污染了 200 英里[○]的太平洋海岸线．所属石油公司被责令在 14 天内将其清除，逾期则要被处以 10 000 美元/天的罚款．当地的清洁队每周可以清洁 5 英里的海岸线，耗资 500 美元/天．额外雇用清洁队则要付每支清洁队 18 000 美元的费用和 500 美元/天的清洁费用．

17

(a)为使公司的总支出最低，应该额外雇用多少支清洁队？采用五步方法，并求出清洁费用．

(b)讨论清洁队每周清洁海岸线长度的灵敏性．分别考虑最优的额外雇用清洁队的数目和公司的总支出．

(c)讨论罚金数额的灵敏性．分别考虑公司用来清理漏油的总天数和公司的总支出．

(d)石油公司认为罚金过高而提起上诉．假设处以罚金的惟一目的是为了促使石油公司及时清理泄漏的石油，那么罚金的数额是否过高？

5. 据估计，长须鲸种群数量的年增长率为 $rx(1-x/K)$，其中 $r=0.08$ 为固有增长率．$K=400\ 000$ 为环境资源所容许的最大可生存种群数量，x 为当前种群数量，现在为 70 000 左右．进一步估计出每年捕获的长须鲸数量约为 $0.000\ 01Ex$，这里 E 为在出海捕鱼期的捕鱼能力水平．给定捕鱼能力 E，长须鲸种群的数量最后会稳定在增长率与捕获率相等的水平．

(a)求使稳定的捕获率达最大的捕鱼能力．采用五步方法及单变量优化模型．

(b)讨论固有增长率的灵敏性．分别讨论最优捕鱼能力与相应的种群数量．

(c)讨论最大可生存种群数量的灵敏性．分别讨论最优捕鱼能力与相应的种群数量．

6. 在习题 5 中，设出海捕鲸每个船上作业日的花费为 500 美元，一头捕获的长须鲸的价格为 6 000 美元．

(a)求使长期收益达最大的捕鱼能力．采用五步方法及单变量优化模型．

(b)讨论捕鲸花费的灵敏性．分别讨论按美元/年计的最终年收益及捕鱼能力．

(c)讨论每头长须鲸的价格的灵敏性．分别讨论收益及捕鱼能力．

(d)在过去的 30 年中，有过几次不成功的全球禁止捕鲸的尝试．讨论捕鲸者连续捕猎的经济动机．特别地，给出捕鲸可以长期获得持续收益的条件

[○] 1 英里＝1 609.344m

[18]　（两个参数的值：每个船上作业日的花费及每头长须鲸的价格）.

7. 仍考虑例 1.1 中的售猪问题，但假设现在的目标是对收益率求最大值(美元/天). 假设猪已经养了 90 天，到现在已为这头猪投入了 100 美元.
   (a)求最佳售猪时间. 采用五步方法及单变量优化模型.
   (b)讨论猪的生长率的灵敏性，分别考虑最佳售猪时间和相应的收益率.
   (c)讨论猪价下降率的灵敏性，分别考虑最佳售猪时间和相应的收益率.
8. 仍考虑例 1.1 中的售猪问题，但现在将猪的生长率随着猪的长大而下降的事实也考虑进来. 假设猪再有 5 个月就会完全长成.
   (a)求使收益最高的最佳售猪时间. 采用五步方法及单变量优化模型.
   (b)讨论猪完全长成时间的灵敏性，分别考虑最佳售猪时间和相应的收益.
9. 一家有 80 000 订户的地方日报计划提高其订阅价格. 现在的价格为每周 1.5 美元. 据估计如果每周提高定价 10 美分，就会损失 5 000 订户.
   (a)求使利润最大的订阅价格. 采用五步方法及单变量优化模型.
   (b)对(a)中所得结论讨论损失 5 000 订户这一参数的灵敏性. 分别假设这个参数值为：3 000、4 000、5 000、6 000 及 7 000，计算最优订阅价格.
   (c)设 $n=5\ 000$ 为提高定价 10 美分而损失的订户数. 求最优订阅价格 p 作为 n 的函数关系. 并用这个公式来求灵敏性 $S(p、n)$.
   (d)这家报纸是否应该改变其订阅价格？用通俗易懂的语言说明你的结论.

1.5　进一步的阅读文献

Cameron, D., Giordano, F., and Weir, M. *Modeling Using the Derivative: Numerical and Analytic Solutions*, UMAP module 625.

Cooper, L. and Sternberg, D. (1970). *Introduction to Methods of Optimization*, W.B. Saunders, Philadelphia.

Gill, P., Murray, W., and Wright, M. (1981). *Practical Optimization*, Academic Press, New York.

Meyer, W. (1984). *Concepts of Mathematical Modeling*, McGraw–Hill, New York.

Rudin W. (1976). *Principles of Mathematical Analysis*, 3rd ed., McGraw–Hill, New York.

Whitley, W. *Five Applications of Max–Min Theory from Calculus*, UMAP module 341.

[19 ~ 20]

第2章　多变量最优化

许多最优化问题要求同时考虑一组相互独立的变量．本章我们讨论一类最简单的多变量最优化问题．大多数学生在多元微积分中已熟悉了有关的方法．本章我们还要介绍借助计算机代数系统来处理一些较复杂的代数计算问题．

2.1　无约束最优化

最简单的多变量最优化问题为在一个比较好的区域上求一个可微的多元函数的最大值或最小值．我们在后面会看到，当求最优值的区域形式比较复杂时，问题就会变得复杂．

例 2.1　一家彩电制造商计划推出两种新产品：一种 19 英寸[○]立体声彩色电视机，制造商建议零售价(MSRP)为 339 美元．另一种 21 英寸立体声彩色电视机，零售价为 399 美元．公司付出的成本为 19 英寸彩电每台 195 美元，21 英寸彩电每台 225 美元，还要加上 400 000 美元的固定成本．在竞争的销售市场中，每年售出的彩电数量会影响彩电的平均售价．据估计，对每种类型的彩电，每多售出一台，平均销售价格会下降 1 美分．而且 19 英寸彩电的销售会影响 21 英寸彩电的销售，反之也是如此．据估计，每售出一台 21 英寸彩电，19 英寸彩电的平均售价会下降 0.3 美分，而每售出一台 19 英寸彩电，21 英寸彩电的平均售价会下降 0.4 美分．问题是：每种彩电应该各生产多少台？

我们仍采用上一章介绍的处理数学建模问题的五步方法来解决这个问题．第一步是提出问题．我们首先列出一张变量表，然后写出这些变量间的关系和所作的其他假设，如取值非负要求．最后，采用我们引入的符号，将问题用数学公式表达．第一步的结果归纳在图 2-1 中．

第二步是选择一个建模方法．这个问题我们视为无约束的多变量最优化问题．这类问题通常在多元微积分的入门课程中都有介绍．我们只在这里给出模型的要点和一般的求解过程，细节和数学证明读者可以参考任何一本微积分的入门教科书．

给定定义在 n 维空间$\mathbb{R}^n$ 的子集 S 上的函数 $y=f(x_1, \cdots, x_n)$．我们要求 f 在集合 S 上的最大值或最小值．一个定理给出：若 f 在 S 的某个内点$(x_1, \cdots, x_n)$达极大值或极小值，设 f 在这点可微，则在这个点上，$\nabla f=0$．也就是说，在极值点有

$$\frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1,\cdots,x_n)=0$$

○　1 英寸＝0.0254m

$$\frac{\partial f}{\partial x_n}(x_1,\cdots,x_n)=0. \tag{1}$$

据此我们可以在求极大或极小点时不考虑那些在 S 内部，使 f 的某一个偏导数不为 0 的点. 因此，要求极大或极小点，我们就要求解方程组(1)给出的 n 个未知数、n 个方程的联立方程组. 然后我们还要检查 S 的边界上的点，以及那些一个或多个偏导数没有定义的点.

变量：

s=19 英寸彩电的售出数量(每年)
t=21 英寸彩电的售出数量(每年)
p=19 英寸彩电的销售价格(美元)
q=21 英寸彩电的销售价格(美元)
C=生产彩电的成本(美元/年)
R=彩电销售的收入(美元/年)
P=彩电销售的利润(美元/年)

假设：

$p=339-0.01s-0.003t$
$q=399-0.004s-0.01t$
$R=ps+qt$
$C=400\,000+195s+225t$
$P=R-C$
$s\geqslant 0$
$t\geqslant 0$

目标： 求 P 的最大值

22

图 2-1 彩电问题的第一步的结果

第三步是根据第二步中选择的标准形式推导模型的公式.

$$\begin{aligned}P&=R-C\\&=ps+qt-(400\,000+195s+225t)\\&=(339-0.01s-0.003t)s\\&\quad+(399-0.004s-0.01t)t\\&\quad-(400\,000+195s+225t).\end{aligned}$$

我们令 $y=P$ 作为求最大值的目标变量，$x_1=s$，$x_2=t$ 作为决策变量. 我们的问题现在化为在区域

$$S=\{(x_1,x_2):x_1\geqslant 0,x_2\geqslant 0\}. \tag{2}$$

23 上对：

$$\begin{aligned}y&=f(x_1,x_2)\\&=(339-0.01x_1-0.003x_2)x_1\\&\quad+(399-0.004x_1-0.01x_2)x_2\\&\quad-(400\,000+195x_1+225x_2)\end{aligned} \tag{3}$$

求最大值.

第四步是利用第二步给出的标准解决方法来求解这个问题. 问题是对(3)式

中定义的函数 f 在(2)式定义的区域 S 上求最大值．图 2-2 给出了函数 f 的 3 维图像．图像显示，f 在 S 的内部达到最大值．图 2-3 给出了 f 的水平集图．从中我们可以估计出 f 的最大值出现在 $x_1=5\ 000$，$x_2=7\ 000$ 附近．函数 f 是一个抛物面，其最高点为令 $\nabla f=0$ 得到的方程组(1)的惟一解．计算得出，在点：

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{554\ 000}{117} \approx 4\ 735 \\ x_2 &= \frac{824\ 000}{117} \approx 7\ 043. \end{aligned} \tag{4}$$

处有：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_1} &= 144 - 0.02x_1 - 0.007x_2 = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} &= 174 - 0.007x_1 - 0.02x_2 = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

(4)式给出的点(x_1, x_2)为 f 在整个实平面上的整体最大值点，从而也是 f 在(2)式定义的区域 S 上的最大值点．将(4)式代回到(3)式中，可得到 f 的最大值：

$$y = \frac{21\ 592\ 000}{39} \approx 553\ 641. \tag{6}$$

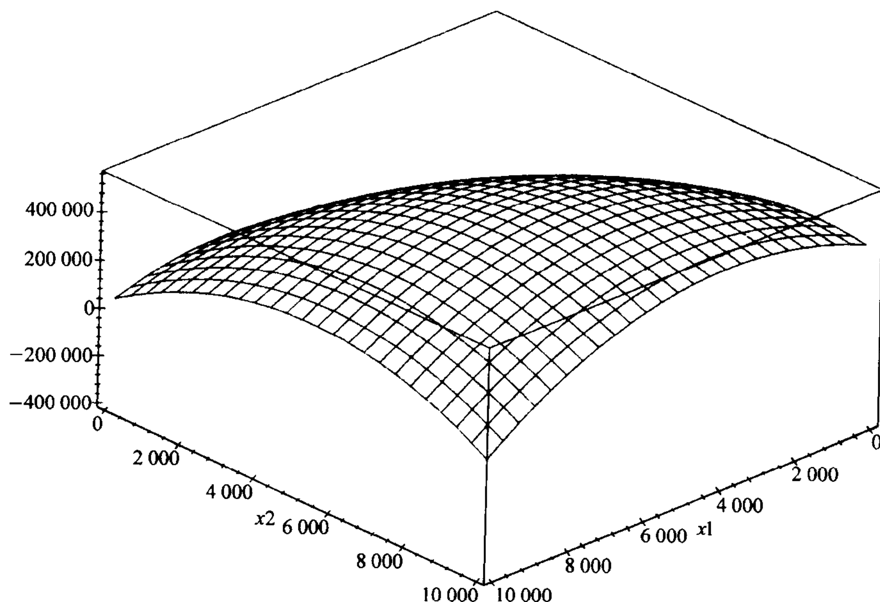


图 2-2　彩电问题的利润 $f(x_1, x_2)$关于 19 英寸彩电的生产量 x_1 和 21 英寸彩电的生产量 x_2 的 3 维图像

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) = &(339 - 0.01x_1 - 0.003x_2)x_1 \\ &+ (399 - 0.004x_1 - 0.01x_2)x_2 \\ &- (400\ 000 + 195x_1 + 225x_2) \end{aligned}$$

24

这个问题中第四步的计算有一点繁琐．这种情况采用计算机代数系统来进行所需的计算比较方便．计算机代数系统可以求导数、求积分、解方程组、化简代数表达式．大多数软件还可以进行矩阵计算、画图、求解某些微分方程组．几个比较好的计算机代数系统(如 MAPLE，MATHEMATICA ，DERIVE 等)对大型计算机和个人计算机都适用，而且许多系统还提供价格相当低的学生版本．图 2-2 和图 2-3 中的图像就是利用计算机代数系统 MAPLE 画出的．计算机代数系统就是我们在五步方法的归纳图 1-3 中提到的“适当的技术”的一个例子．图 2-4 给出了利用计算机代数系统 MATHEMATICA 求解当前模型的结果．利用计算机代数系统求解一个这样的问题有几项优点．它可以提高效率，结果更准确．掌握了这一技术，可以使你获得较大的自由来专注于那些更大问题的求解任务，而不必陷于繁琐的计算中．我们还会在灵敏性分析的计算中展示计算机代数系统的应用，那里的计算要更复杂．

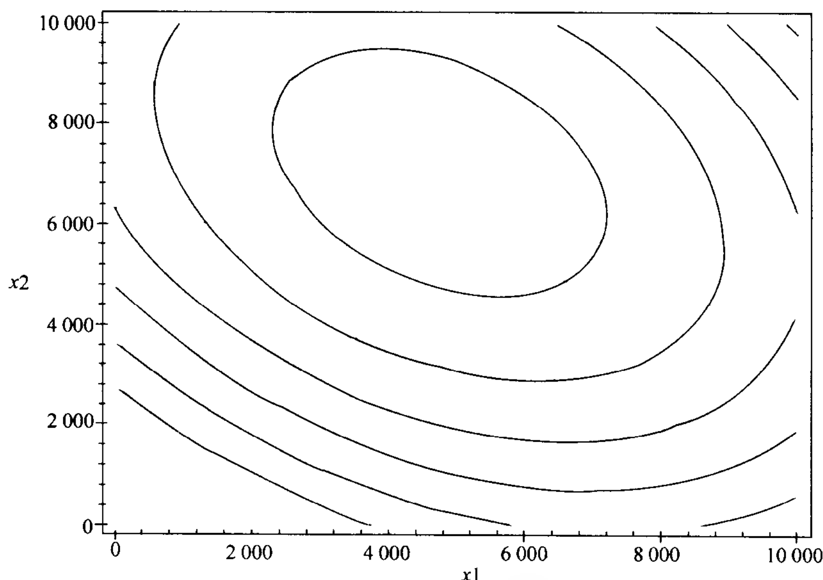


图 2-3　彩电问题中关于 19 英寸彩电的生产量 x_1 和 21 英寸彩电的生产量 x_2 的利润函数 $f(x_1, x_2)$ 的水平集图

$$f(x_1, x_2)=(339-0.01x_1-0.003x_2)x_1+(399-0.004x_1-0.01x_2)x_2-(400\,000+195x_1+225x_2)$$

最后的步骤五是用通俗易懂的语言回答问题．简单地说，这家公司可以通过生产 4 735 台 19 英寸彩电和 7 043 台 21 英寸彩电来获得最大利润，每年获得的净利润为 553 641 美元．19 英寸彩电的每台平均售价为 270.52 美元，21 英寸彩

电的每台平均售价为 309.63 美元．生产的总支出为 2 908 000 美元，相应的利润率为 19%．这些结果显示了这是有利可图的，因此我们建议这家公司的推出新产品计划应该实行．

25

```
In[1]:    y = (339 - x1/100 - 3x2/1000) x1 +
              (399 - 4x1/1000 - x2/100)x2 -
              (400000 + 195x1 + 225x2)
Out[1]    (-x1/100 - 3x2/1000 + 339) x1 - 195x1 + (-x1/250 - x2/100 + 399)
          x2 - 225x2 - 400000
In[2]:    dydx1 = D[y, x1]
Out[2]    -x1/50 - 7x2/1000 + 144
In[3]:    dydx2 = D[y, x2]
Out[3]    -7x1/1000 - x2/50 + 174
In[4]:    s = Solve[{dydx1 == 0, dydx2 == 0}, {x1, x2}]
Out[4]    {{x1 → 554000/117, x2 → 824000/117}}
In[5]:    N[s]
Out[5]    {{x1 → 4735.04, x2 → 7042.74}}
In[6]:    y /. s
Out[6]    {21592000/39}
In[7]:    N[%]
Out[7]    {553641.}
```

图 2-4　利用计算机代数系统 MATHEMATICA 求出的彩电问题的最优解

上面得出的结论是以图 2-1 中所作的假设为基础的．在向公司报告我们的结论之前，应该对我们关于彩电市场和生产过程所作的假设进行灵敏性分析，以保证我们的结果具有稳健性．我们主要关心的是决策变量 x_1，x_2 的值，因为公司要据此来确定生产量．

我们对 19 英寸彩电的价格弹性系数 a 的灵敏性进行分析．在模型中我们假设 $a=0.01$ 美元/台．将其代入前面的公式中，我们得到

26

$$\begin{aligned} y &= f(x_1, x_2) \\ &= (339 - ax_1 - 0.003x_2)x_1 \\ &\quad + (399 - 0.004x_1 - 0.01x_2)x_2 \\ &\quad - (400\,000 + 195x_1 + 225x_2). \end{aligned} \tag{7}$$

27

求偏导数并令它们为零，可得

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 144 - 2ax_1 - 0.007x_2 = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2}=174-0.007x_1-0.02x_2=0. \tag{8}$$

同前面类似解出 x_1，x_2

$$x_1=\frac{1\,662\,000}{40\,000a-49}$$
$$x_2=8\,700-\frac{581\,700}{40\,000a-49}. \tag{9}$$

图 2-5、图 2-6 画出了 x_1、x_2 关于 a 的曲线图. 由图上显示，19 英寸彩电的价格弹性系数 a 的提高，会导致 19 英寸彩电的最优生产量 x_1 的下降，及 21 英寸彩电的最优生产量 x_2 的提高. 而且显示 x_1 比 x_2 对于 a 更敏感. 这些看起来都是合理的. 为得到这些灵敏性的具体数值，我们计算出在 $a=0.01$，有

28

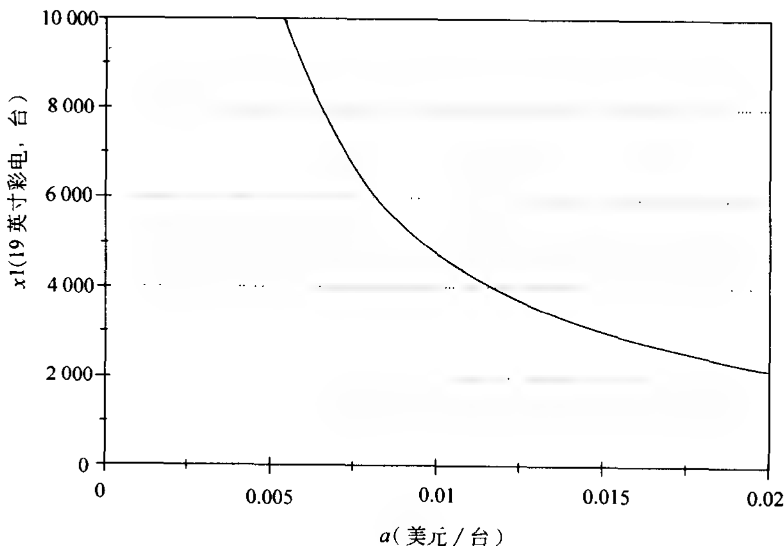
$$\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}=\frac{-66\,480\,000\,000}{(40\,000a-49)^2}=\frac{-22\,160\,000\,000}{41\,067}$$

因此

$$S(x_1,a)=\left(\frac{-22\,160\,000\,000}{41\,067}\right)\left(\frac{0.01}{554\,000/117}\right)=-\frac{400}{351}\approx-1.1.$$

类似地可计算出

$$S(x_2,a)=\frac{9\,695}{36\,153}\approx 0.27.$$



29

图 2-5　彩电问题中 19 英寸彩电的最优生产量 x_1 关于价格弹性系数 a 的曲线图

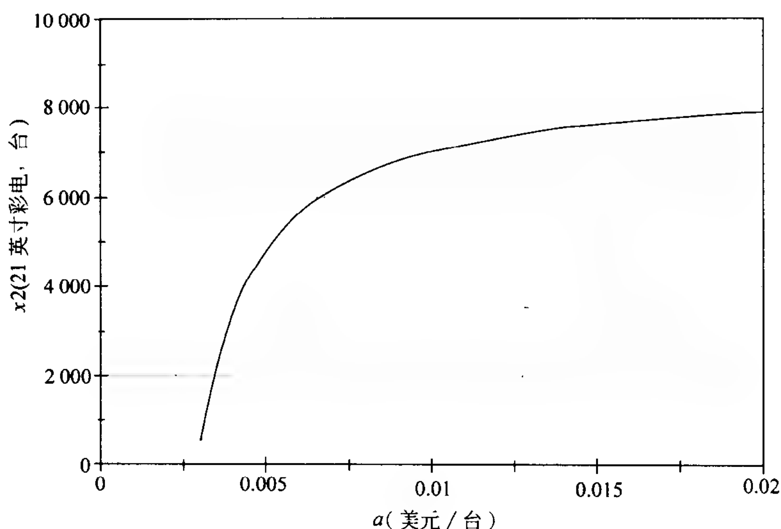


图 2-6　彩电问题中 21 英寸彩电的最优生产量 x_2 关于价格弹性系数 a 的曲线图

如果 19 英寸彩电的价格弹性系数提高 10%，则我们应该将 19 英寸彩电的生产量缩小 11%，21 英寸彩电的生产量扩大 2.7%.

下面我们来讨论 y 对于 a 的灵敏性. 19 英寸彩电的价格弹性系数的变化会对利润造成什么影响? 为得到 y 关于 a 的表达式，我们将(9)式代入到(7)式中，得到

$$\begin{aligned} y = &\left[339 - a\left(\frac{1\,662\,000}{40\,000a - 49}\right) - 0.003\left(8\,700 - \frac{581\,700}{40\,000a - 49}\right)\right]\left(\frac{1\,662\,000}{40\,000a - 49}\right) \\ &+ \left[339 - 0.004\left(\frac{1\,662\,000}{40\,000a - 49}\right) - 0.01\left(8\,700 - \frac{581\,700}{40\,000a - 49}\right)\right] \\ &\times\left(8\,700 - \frac{581\,700}{40\,000a - 49}\right) - \left[400\,000 + 195\left(\frac{16\,620\,000}{40\,000a - 49}\right) + 225\right. \\ &\left.\times\left(8\,700 - \frac{581\,700}{340\,000a - 49}\right)\right]. \end{aligned} \tag{10}$$

30

图 2-7 画出了 y 关于 a 的曲线图. 由图上显示，19 英寸彩电的价格弹性系数 a 的提高，会导致利润的下降.

为计算 $S(y, a)$，我们要求出 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}a$ 的公式. 一种方法是直接对(10)式的单变量函数求导，这里可以借助于某个计算机代数系统. 另一种计算上更有效的方法是利用多变量函数的链式法则：

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}a} = \frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a} + \frac{\partial y}{\partial x_2}\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a} + \frac{\partial y}{\partial a}. \tag{11}$$

由于在极值点 $\partial y/\partial x_1$ 与 $\partial y/\partial x_2$ 都为零，则有

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}a} = \frac{\partial y}{\partial a} = -x_1^2$$

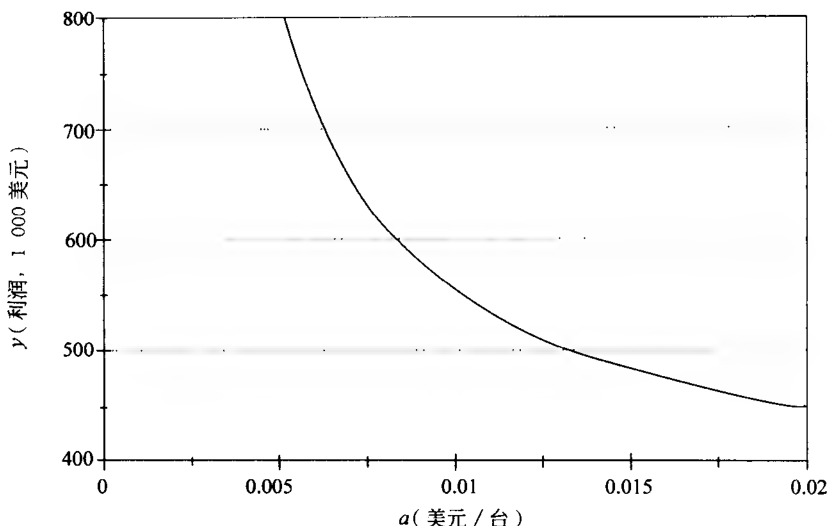


图 2-7 彩电问题中最优利润 y 关于价格弹性系数 a 的曲线图

由(7)式可直接得到

$$S(y,a)=-\left(\frac{554\ 000}{117}\right)^2\frac{0.01}{(21\ 592\ 000/39)}$$

$$=-\frac{383\ 645}{947\ 349}\approx -0.40.$$

因此，19 英寸彩电的价格弹性系数提高 10%，会使利润下降 4%.

(11)式中的

$$\frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}+\frac{\partial y}{\partial x_2}\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a}=0$$

有其实际意义. 导数 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}a$ 中的这一部分代表了最优生产量 x_1 和 x_2 的变化对利润的影响. 其和为零说明了生产量的微小变化(至少在线性近似时)对利润没有影响. 从几何上看，由于 $y=f(x_1, x_2)$在极值点是平的，x_1 和 x_2 的微小变化对 y 几乎没有什么影响. 由于 19 英寸彩电的价格弹性系数 10%的提高而导致的最优利润的下降几乎全部是由售价的改变引起的. 因此我们的模型给出的生产量几乎是最优的. 例如，设 $a=0.01$，但实际的价格弹性系数比它高出了 10%. 我们用(5)式来确定生产量，这意味着与由(9)式给出的 $a=0.011$ 的最优解相比，我们会多生产 10%的 19 英寸彩电，而少生产约 3%的 21 英寸彩电. 而且利润也会比最优值低 4%. 但如果我们仍采用该模型的结果实际会损失什么呢? 仍按(5)式取 $a=0.011$ 确定生产量，会得到利润值为 531 219 美元. 而最优利润为 553 514美元(在(9)式中令 $a=0.011$ 并代入到(7)式中). 因此，采用我们模型的结果，虽然现在的生产量与最优的生产量有相当的差距，但获得的利润仅仅

31

比可能的最优利润损失了 0.43%. 在这一意义下，我们的模型显示了非常好的稳健性. 进一步地，许多类似的问题都可以得出类似的结论，这主要是因为在临界点处有$\nabla f=0$.

前面所做的灵敏性分析的计算都可以借助于计算机代数系统完成. 事实上，只要有可用的系统，这是首选的方法. 图 2-8 给出了利用计算机代数系统 MAPLE 计算灵敏性 $S(x_1, a)$的过程，其他灵敏性的计算也是类似的.

```
> y:=(339-a*x1-3*x2/1000)*x1
>    +(399-4*x1/1000-x2/100)*x2-(400000+195*x1+225*x2);
```

$$y := \left(339 - a x1 - \frac{3}{1000} x2\right) x1 + \left(399 - \frac{1}{250} x1 - \frac{1}{100} x2\right) x2 - 400000 - 195 x1 - 225 x2$$

```
> dydx1:=diff(y,x1);
```

$$dydx1 := -2 a x1 + 144 - \frac{7}{1000} x2$$

```
> dydx2:=diff(y,x2);
```

$$dydx2 := -\frac{7}{1000} x1 - \frac{1}{50} x2 + 174$$

```
> s:=solve({dydx1=0, dydx2 = 0}, {x1,x2});
```

$$s := \left\{x1 = \frac{1662000}{40000 a - 49}, x2 = 48000 \frac{7250 a - 21}{40000 a - 49}\right\}$$

```
> assign(s);
> dx1da:=diff(x1,a);
```

$$dx1da := -\frac{66480000000}{(40000 a - 49)^2}$$

```
> assign(a=1/100);
> x1;
```

$$\frac{554000}{117}$$

```
> sx1a:=dx1da*(a/x1);
```

$$sx1a := \frac{-400}{351}$$

```
> evalf(sx1a);
```

$$-1.139601140$$

图 2-8　彩电问题中利用计算机代数系统 MAPLE 计算灵敏性 $S(x_1, a)$

对其他弹性系数的灵敏性分析可以用同样方式进行. 虽然细节有所不同，但函数 f 的形式使得每一个弹性系数对 y 的影响在本质上具有相同的模式. 特别地，即使对价格弹性系数的估计存在一些小误差，我们的模型也可以给出对生产量的很好的决策(几乎是最优的)，对这一点我们有高度的自信.

我们只简单地讨论一下一般的稳健性问题. 我们的模型建立在线性价格结构的基础上. 这显然只是一种近似. 但在实际应用中，我们会按如下过程进行：首先对新产品的市场情况做出有根据的推测，并制订出合理的平均销售价格. 然后根据过去类似情况下的经验或有限的市场调查估计出各个弹性系数. 我们应该能对销售水平在某一范围内变化时估计出合理的弹性系数值. 这个范围应该包括最

优值．于是我们实际上只是对一个非线性函数在一个相当小的区域上进行线性近似．这类近似通常都会有稳健性．这就是微积分的基本思想．

2.2　拉格朗日乘子

本节我们开始讨论具有较复杂结构的最优化问题．我们在上一节的开始就提到，当寻求最优解的集合变得复杂时，多变量优化问题的求解就会复杂化．在实际问题中，由于存在着对独立变量的限制条件，使我们不得不考虑这些更复杂的模型．[32]

例 2.2　再来考虑在上一节中提出的彩电问题(例 2.1)．在那里我们假设公司每年有能力生产任何数量的彩电．现在我们根据允许的生产能力引入限制条件．公司考虑投产这两种新产品是由于计划停止黑白电视机的生产．这样装配厂就有了额外的生产能力．这些额外的生产能力可以用来提高那些现有产品的产量，但公司认为新产品会带来更高的利润．据估计，现有的允许生产能力每年可以生产 10 000 台电视(约每周 200 台)．公司有充足的 19 英寸，21 英寸彩色显像管、底盘及其他标准配件．但现在生产立体声电视所需要的电路板供给不足．此外，19 英寸彩电需要的电路板与 21 英寸彩电的不同，这是由于其内部结构造成的．[33] 只有进行较大的重新设计才能改变这一点，但公司现在不准备做这项工作．电路板的供应商每年可以提供 8 000 块 21 英寸彩电的电路板和 5 000 块 19 英寸彩电的电路板．考虑到所有这些情况，彩电公司应该怎样确定其生产量？

我们仍采用五步方法．第一步的结果在图 2-9 中．惟一的改变是对决策变量 s 和 t 所加的一些额外限制．第二步是选择建模方法．这个问题的模型为多变量有约束最优化问题，我们利用拉格朗日乘子法来求解．[34]

变量：

s＝19 英寸彩电的售出数量(每年)
t＝21 英寸彩电的售出数量(每年)
p＝19 英寸彩电的销售价格(美元)
q＝21 英寸彩电的销售价格(美元)
C＝生产彩电的成本(美元/年)
R＝彩电销售的收入(美元/年)
P＝彩电销售的利润(美元/年)

假设：

$p=339-0.01s-0.003t$
$q=399-0.004s-0.01t$
$R=ps+qt$
$C=400\,000+195s+225t$
$P=R-C$
$s\leqslant 5\,000$
$t\leqslant 8\,000$
$s+t\leqslant 10\,000$
$s\geqslant 0$
$t\geqslant 0$

目标：求 P 的最大值

图 2-9　彩电问题的第一步的结果

给定一个函数 $y=f(x_1, \cdots, x_n)$ 及一组约束．这里我们假设这些约束可以用 k 个等式表示

$$
\begin{aligned}
g_1(x_1,\cdots,x_n) &= c_1 \\
g_2(x_1,\cdots,x_n) &= c_2 \\
&\vdots \\
g_k(x_1,\cdots,x_n) &= c_k.
\end{aligned}
$$

我们在后面会介绍如何处理不等式约束．我们的目标是在集合

$$S = \{(x_1,\cdots,x_n):\ g_i(x_1,\cdots,x_n) = c_i,\quad i = 1,\cdots,k\}.$$

上对

$$y = f(x_1,\cdots,x_n)$$

求最大值．一个定理保证了在极值点 $x\in S$，一定有

$$\nabla f = \lambda_1 \nabla g_1 + \cdots + \lambda_k \nabla g_k.$$

这里 $\lambda_1, \cdots, \lambda_k$ 称为拉格朗日乘子．定理假设 $\nabla g_1, \cdots, \nabla g_k$ 是线性无关向量（[Edward，1973]，p. 113）．为了求出 f 在集合 S 上的极大或极小值点，我们要一起求解关于变量 $x_1, \cdots, x_n$ 和 $\lambda_1, \cdots, \lambda_k$ 的 n 个拉格朗日乘子方程及 k 个约束方程：

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial x_1} &= \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_1} + \cdots + \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial x_1} \\
&\vdots \\
\frac{\partial f}{\partial x_n} &= \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_n} + \cdots + \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial x_n} \\
g_1(x_1,\cdots,x_n) &= c_1 \\
&\vdots \\
g_k(x_1,\cdots,x_n) &= c_k
\end{aligned}
$$

35

这里我们还要检查那些不满足梯度向量 $\nabla g_1, \cdots, \nabla g_k$ 线性无关的异常点．

拉格朗日乘子法以梯度向量的几何解释为基础．假设只有一个约束函数

$$g(x_1,\cdots,x_n) = c,$$

则拉格朗日乘子方程变为

$$\nabla f = \lambda \nabla g.$$

集合 $g=c$ 为 $\mathbb{R}^n$ 中的 $n-1$ 维曲面．对任意点 $x\in S$，梯度向量 $\nabla g(x)$ 在这点与 S 垂直．而梯度向量 ∇f 总是指向 f 增加最快的方向．在局部极大或极小值点，f 增加最快的方向也应该与 S 垂直，于是在这一点，∇f 与 ∇g 指向同一个方向，即 $\nabla f=\lambda\nabla g$.

在有多个约束的情况下，几何的原理是类似的．现在 S 为 k 个曲面 $g_1=c_1, \cdots, g_k=c_k$ 的交集．每一个曲面都是 $\mathbb{R}^n$ 中的 $n-1$ 维子集，从而它们的交集为 $n-k$ 维子集．在极值点，∇f 一定与 S 垂直，因而它一定在由 k 个向量 $\nabla g_1, \cdots, \nabla g_k$ 张成的线性空间中．线性无关的假设保证了这 k 个向量 $\nabla g_1, \cdots, \nabla g_k$ 确实可以生成一个 k 维线性空间．（在单个约束的情况下，线性无关即为 $\nabla g\neq 0$.）

例 2.3　在集合 $x^2+y^2+z^2=3$ 上求 $x+2y+3z$ 的最大值点.

这是一个有约束的多变量优化问题. 我们定义目标函数为

$$f(x,y,z)=x+2y+3z$$

约束函数为

$$g(x,y,z)=x^2+y^2+z^2$$

[36] 计算出

$$\nabla f=(1,2,3)$$
$$\nabla g=(2x,2y,2z).$$

在极值点，有 $\nabla f=\lambda\nabla g$，即

$$1=2x\lambda$$
$$2=2y\lambda$$
$$3=2z\lambda.$$

这里给出了有四个未知数的三个方程. 将 x，y，z 用 λ 表示，有

$$x=1/2\lambda$$
$$y=1/\lambda$$
$$z=3/2\lambda.$$

利用 $x^2+y^2+z^2=3$，可得到一个关于 λ 的二次方程，共有两个实根. 由根 $\lambda=\sqrt{42}/6$ 求得

$$x=\frac{1}{2\lambda}=\frac{\sqrt{42}}{14}$$

$$y=\frac{1}{\lambda}=\frac{\sqrt{42}}{7}$$

$$z=\frac{3}{2\lambda}=\frac{3\sqrt{42}}{14},$$

从而

$$a=\left(\frac{\sqrt{42}}{14},\frac{\sqrt{42}}{7},\frac{3\sqrt{42}}{14}\right)$$

为一个可能的极值点. 由另一个根 $\lambda=-\sqrt{42}/6$ 得到另一个可能的极值点 $b=-a$. 因为在约束集合 $g=3$ 上，处处都有 $\nabla g\neq 0$，因此只有 a 和 b 两点为可能的极值点. 由于 f 为有界闭集 $g=3$ 上的连续函数，则 f 一定可以在这个集合上达

[37] 到最大值和最小值. 由于

$$f(a)=\sqrt{42},\quad f(b)=-\sqrt{42},$$

从而 a 为最大值点，b 为最小值点. 从几何上考虑这个例子. 约束集合 S 由方程

$$x^2+y^2+z^2=3$$

定义. 这是 $\mathbb{R}^3$ 中以原点为球心，$\sqrt{3}$ 为半径的球面. 目标函数

$$f(x,y,z)=x+2y+3z$$

的水平集为 $\mathbb{R}^3$ 中的平面族. 点 a 和 b 为球面 S 上仅有的两个点，在此处水平集中的平面与球面 S 相切. 在极大点 a，梯度向量 ∇f 与 ∇g 的方向一致，在极小点

b，梯度向量∇f与∇g的方向相反.

例 2.4 在集合 $x^2+y^2+z^2=3$ 与 $x=1$ 上求 $x+2y+3z$ 的最大值点.

目标函数为

$$f(x,y,z) = x+2y+3z,$$

于是

$$\nabla f = (1,2,3).$$

约束函数为

$$g_1(x,y,z) = x^2+y^2+z^2$$
$$g_2(x,y,z) = x.$$

计算出

$$\nabla g_1 = (2x,2y,2z)$$
$$\nabla g_2 = (1,0,0).$$

拉格朗日乘子的公式为$\nabla f=\lambda_1 \nabla g_1+\lambda_2 \nabla g_2$，即

$$1 = 2x\lambda_1+\lambda_2$$
$$2 = 2y\lambda_1$$
$$3 = 2z\lambda_1.$$

将 x，y，z 用λ_1，λ_2 表示，有

38

$$x = \frac{(1-\lambda_2)}{2\lambda_1}$$
$$y = \frac{2}{2\lambda_1}$$
$$z = \frac{3}{2\lambda_1}.$$

代入到约束方程 $x=1$ 中，得到 $\lambda_2=1-2\lambda_1$. 将它们都代入到另一个方程

$$x^2+y^2+z^2 = 3$$

中，得到一个关于 λ_1 的二次方程，解出 $\lambda_1=\pm\sqrt{26}/4$. 代回到 x，y，z 的公式中，得到如下两个解：

$$c = \left(1,\frac{2\sqrt{26}}{13},\frac{3\sqrt{26}}{13}\right)$$
$$d = \left(1,\frac{-2\sqrt{26}}{13},\frac{-3\sqrt{26}}{13}\right).$$

因为在约束集合上，梯度向量∇g_1 与∇g_2 处处都是线性无关的，因此只有 c 和 d 两点为可能的最大值点. 由于 f 一定能在有界闭集达到最大值，我们只要计算每个可能的极值点的 f 值来找出最大值点. 最大值为

$$f(c) = 1+\sqrt{26},$$

而点 d 为局部极小值点. 这个例子中的约束集合 S 为$\mathbb{R}^3$ 中由球面 $x^2+y^2+z^2=3$ 和平面 $x=1$ 相交得出的圆. 像上一个例子一样，函数 f 的水平集为$\mathbb{R}^3$ 中的平面族. 在 c 和 d 点平面与圆 S 相切.

不等式约束可以通过拉格朗日乘子法和无约束问题的求解方法的组合来解

决. 在例 2.4 中，用不等式约束 $x \geq 1$ 来代替原约束 $x=1$. 我们将集合

$$S = \{(x,y,z): x^2+y^2+z^2=3, x \geq 1\}$$

看成两个子集合的并. 在第一个子集

$$S_1 = \{(x,y,z): x^2+y^2+z^2=3, x=1\}$$

上，通过我们前面的分析，其最大值发生在点

39

$$c = \left(1\sqrt{\frac{8}{13}}, 1.5\sqrt{\frac{8}{13}}\right)$$

我们可以计算出在这一点

$$f(x,y,z) = 1 + 6.5\sqrt{\frac{8}{13}} = 6.01$$

再考虑另一个子集

$$S_2 = \{(x,y,z): x^2+y^2+z^2=3, x>1\},$$

由例 2.3 中的分析，我们可以知道在这个集合上的任何一处都没有 f 的局部极大值点. 因此 f 在 S_1 上的最大值即为 f 在集合 S 上的最大值. 如果我们考虑 f 在集合

$$S = \{(x,y,z): x^2+y^2+z^2=3, x \leq 1\},$$

上的最大值，仍由例 2.3 中的分析，可知最大值会在点

$$a = \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{6}{7}}$$

处达到.

现在仍回到在本节开始讨论的问题. 我们可以继续进行求解过程的第三步. 将修改后的彩电问题作为有约束的多变量优化问题来处理. 我们要对关于两个决策变量 $x_1=s$, $x_2=t$ 的函数 $y=P$(利润)求最大值. 目标函数与以前一样

$$\begin{aligned} y &= f(x_1, x_2) \\ &= (339 - 0.01x_1 - 0.003x_2)x_1 + (399 - 0.004x_1 - 0.01x_2)x_2 \\ &\quad - (400\,000 + 195x_1 + 225x_2). \end{aligned}$$

我们要对 f 在满足如下约束的 x_1, x_2 的集合 S 上求最大值

$$\begin{aligned} x_1 &\leq 5\,000 \\ x_2 &\leq 8\,000 \\ x_1 + x_2 &\leq 10\,000 \\ x_1 &\geq 0 \\ x_2 &\geq 0. \end{aligned}$$

40

这一集合称为可行域，这是因为它是所有可能的生产量构成的集合. 图 2-10 画出了这个问题的可行域.

我们用拉格朗日乘子法在集合 S 上对 $y=f(x_1, x_2)$ 求最大值. 计算出

$$\nabla f = (144 - 0.02x_1 - 0.007x_2, 174 - 0.007x_1 - 0.02x_2).$$

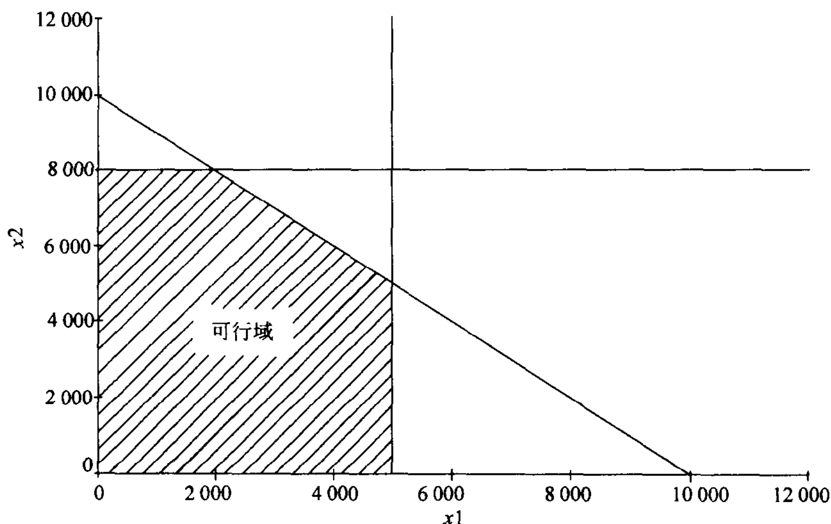


图 2-10　有约束的彩电问题中 19 英寸彩电的所有可能生产量 x_1 及 21 英寸彩电的所有可能生产量 x_2 的可行域图

因为在 S 的内部有 $\nabla f \neq 0$，最大值一定在边界达到. 首先考虑在约束直线

$$g(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = 10\ 000.$$

上的一段边界. 这时 $\nabla g = (1, 1)$，从而拉格朗日乘子方程为

$$\begin{aligned} 144 - 0.02x_1 - 0.007x_2 &= \lambda \\ 174 - 0.007x_1 - 0.02x_2 &= \lambda. \end{aligned} \tag{12}$$

[41]

与约束方程

$$x_1 + x_2 = 10\ 000$$

一起求解，得到

$$x_1 = \frac{50\ 000}{13} \approx 3\ 846$$

$$x_2 = \frac{80\ 000}{13} \approx 6\ 154$$

$$\lambda = 24.$$

代入到目标函数(2)式中，得到在极大点 $y = 532\ 308$.

[42]

图 2-11 给出了用 MAPLE 画出的可行域及 f 的水平集图像. 水平集 $f = C$ 当 $C = 0$，100 000，…，500 000 时为一族逐渐缩小的同心环. 这些环与可行域相交，水平集 $f = 532\ 308$ 为最小的环. 这个集合刚刚接触到可行域 S，且与直线 $x_1 + x_2 = 10\ 000$ 在极值点相切. 由图上可明显看出，利用拉格朗日乘子法在约束直线 $x_1 + x_2 = 10\ 000$ 上找到的临界点就是 f 在整个可行域上的最大值.

这个点确实是最大值点的代数证明较为麻烦. 通过比较 f 在这个临界点和这

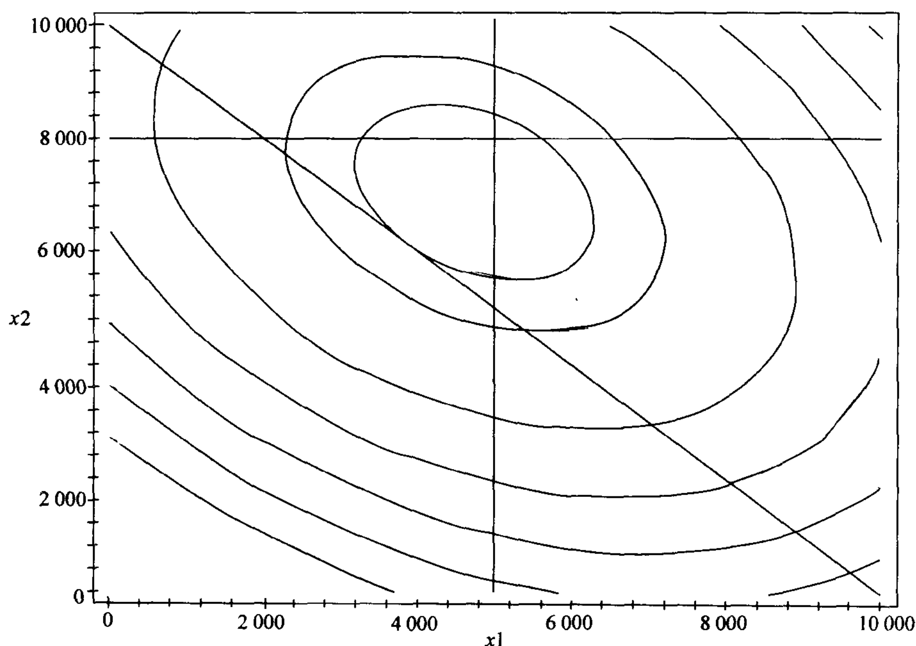


图 2-11 有约束的彩电问题中关于 19 英寸彩电的生产量 x_1 和 21 英寸彩电的生产量 x_2 的利润函数 $f(x_1, x_2)$的水平集图，以及所有可能的生产量的集合

一线段的两个端点(5 000，5 000)，(2 000，8 000)处的值，可以说明这个临界点是这条线段上的极大值点．然后我们在剩余的其他线段上对 f 求极大值，并比较这些结果．比如，f 在落在 x 轴的线段上的极大值发生在 $x_1=5\ 000$ 处．为得到这一结论，对约束 $g(x_1, x_2)=x_2=0$ 应用拉格朗日乘子法．这里 $\nabla g=(0, 1)$，从而拉格朗日乘子方程为

$$144-0.02x_1-0.007x_2=0$$

$$174-0.007x_1-0.02x_2=\lambda.$$

与约束方程 $x_2=0$ 一起求解，得到 $x_1=7\ 200$，$x_2=0$，$\lambda=123.6$．这点在可行域之外，从而此线段上的极大或极小值一定发生在端点(0，0)，(5 000，0)．由于 f 的值在第二个点比较大，则第一个点为极小值点，第二个点为极大值点．这里也可以将约束 $x_2=0$ 代入到 f 中，在此线段上求解一个一维极值问题．由于 f 的最大值出现在斜的线段上，这样我们就找到了 f 在 S 上的最大值．这里第四步中的一些计算比较麻烦，在这种情况下，采用计算机代数系统来完成求导和解方程组的计算比较简便．图 2-12 给出了利用计算机代数系统 MATHEMATICA 来完成在直线约束 $x_1+x_2=10\ 000$ 下的第四步的计算结果．

用通俗的语言说，公司为获得最大利润应生产 3 846 台 19 英寸彩电和 6 154

```
In[1]:    y = (339 - x1/100 - 3x2/1000) x1 +
              (399 - 4x1/1000 - x2/100)x2 -
              (400000 + 195x1 + 225x2)
Out[1]    (-x1/100 - 3x2/1000 + 339) x1 - 195x1 + (-x1/250 - x2/100 + 399)
          x2 - 225x2 - 400000
In[2]:    dydx1 = D[y, x1]
Out[2]    -x1/50 - 7x2/1000 + 144
In[3]:    dydx2 = D[y, x2]
Out[3]    -7x1/1000 - x2/50 + 174
In[4]:    s = Solve[{dydx1 == lambda, dydx2 == lambda,
            x1 + x2 == 10000}, {x1, x2, lambda}]
Out[4]    {{x1 -> 50000/13, x2 -> 80000/13, lambda -> 24}}
In[5]:    N[%]
Out[5]    {{x1 -> 3846.15, x2 -> 6153.85, lambda -> 24.}}
In[6]:    y/.%
Out[6]    {532308.}
```

图 2-12　利用计算机代数系统 MATHEMATICA 求有约束的彩电问题的最优解

台 21 英寸彩电，从而每年的总生产量为 10 000 台，这样的生产量用掉了所有额外的生产能力．能够供应的立体声电路板的资源限制不是关键的．这样可以得到预计每年 532 308 美元的利润．[43]

2.3　灵敏性分析与影子价格

我们在本节讨论拉格朗日乘子法中的灵敏性分析的一些特殊方法．这里我们会看到乘子本身是有实际意义的．

在报告我们对例 2.2 的分析结果之前，进行灵敏性分析是非常重要的．在 2.1 节的最后，我们讨论了无约束模型的价格弹性系数的灵敏性．这一过程对现在的有约束模型也是类似的．我们考察某一特定参数的灵敏性时，在模型中将此参数设为变量，使模型略为一般化．设我们仍讨论 19 英寸彩电的价格弹性系数 a 的灵敏性．仍将目标函数写成(7)式的形式．由 [44]

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}\right),$$

这里 $\partial f/\partial x_1$，$\partial f/\partial x_2$ 由(8)式给出．现在拉格朗日乘子方程为

$$\begin{aligned} 144 - 2ax_1 - 0.007x_2 &= \lambda \\ 174 - 0.007x_1 - 0.02x_2 &= \lambda. \end{aligned} \tag{13}$$

与约束方程

$$g(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = 10\,000$$

一起求解，得到

$$
\begin{aligned}
x_1 &= \frac{50\ 000}{1\ 000a+3} \\
x_2 &= 10\ 000-\frac{50\ 000}{1\ 000a+3} \qquad (14) \\
\lambda &= \frac{650}{1\ 000a+3}-26.
\end{aligned}
$$

计算出

45

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a} &= \frac{-50\ 000\ 000}{(1\ 000a+3)^2} \\
\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a} &= \frac{-\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}, \qquad (15)
\end{aligned}
$$

从而在点 $x_1=3\ 846$，$x_2=6\ 154$，$a=0.01$，有

$$
S(x_1,a)=\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}\cdot\frac{a}{x_1}=-0.77
$$

$$
S(x_2,a)=\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a}\cdot\frac{a}{x_2}=0.48.
$$

图 2-13 和 2-14 画出了 x_1，x_2 关于 a 的曲线图. 如果 19 英寸彩电的价格弹性系数增大，我们要将一部分 19 英寸彩电的生产量转为生产 21 英寸彩电. 如果这一系数减小，我们则要多生产一些 19 英寸彩电，少生产一些 21 英寸彩电. 在任一种情况下，只要(14)式给出的点(x_1，x_2)落在其他约束直线之间($0.007\leqslant a\leqslant 0.022$)，总是可以生产总量为 10 000 台的彩电.

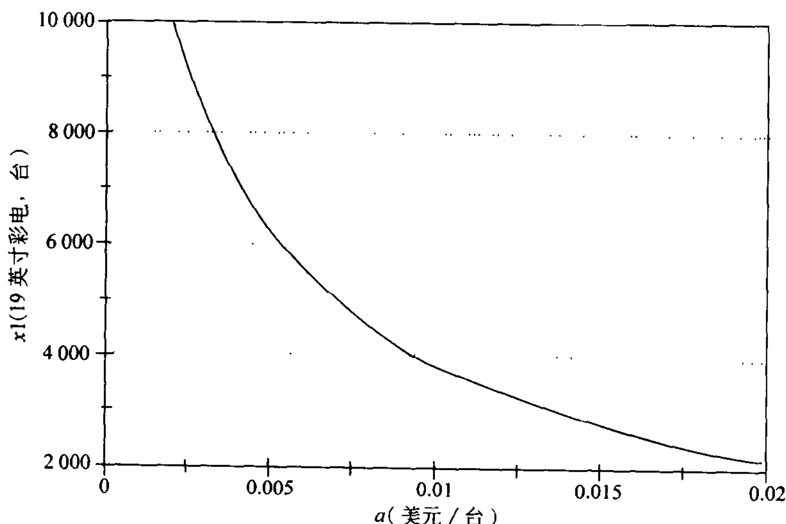


图 2-13　有约束的彩电问题中 19 英寸彩电的最优生产量 x_1 关于价格弹性系数 a 的曲线图

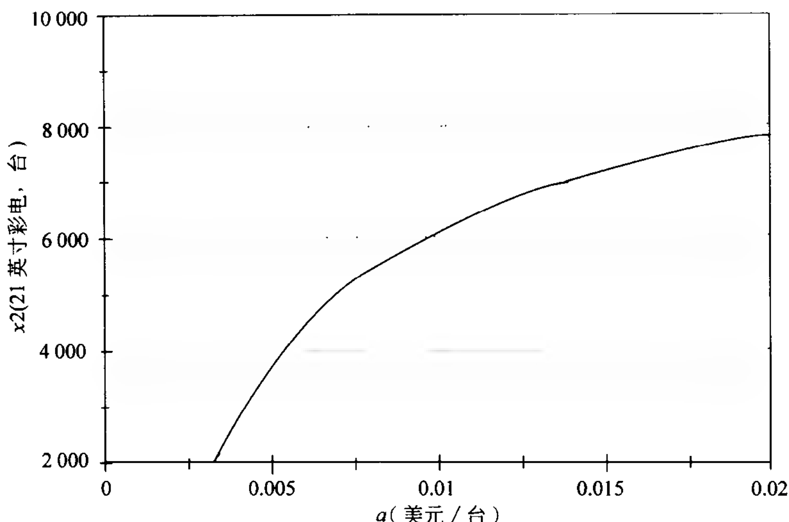


图 2-14　有约束的彩电问题中 21 英寸彩电的最优生产量 x_2 关于价格弹性系数 a 的曲线图

现在我们来讨论最优利润 y 对 19 英寸彩电的价格弹性系数 a 的灵敏性. 为得到 y 关于 a 的表达式，我们将(14)式代入到(3)式中，得到 [46]

$$
\begin{aligned}
y = &\left[339 - a\left(\frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right) - 0.003\left(10\ 000 - \frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right)\right]\left(\frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right) \\
&+ \left[399 - 0.004\left(\frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right) - 0.01\left(10\ 000 - \frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right)\right] \\
&\times\left(10\ 000 - \frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right) - \left[400\ 000 + 195\left(\frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right) + 225\right. \\
&\left.\times\left(10\ 000 - \frac{50\ 000}{1\ 000a+3}\right)\right].
\end{aligned}
$$

图 2-15 为 y 关于 a 的曲线图. 为得到 y 关于 a 的灵敏性的定量结果，我们要对上式求单变量函数的导数. 这可以借助于计算机代数系统来完成. 另一种计算上更有效的方法是在(11)式中用多变量函数求导的链式法则. 对任意 a，梯度向量 ∇f 与约束直线 $g=10\ 000$ 垂直. 由于 [47]

$$x(a) = (x_1(a), x_2(a))$$

为曲线 $g=10\ 000$ 上的一个点，速度向量

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}a} = \left(\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}, \frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a}\right)$$

与此曲线相切. 这样 ∇f 就与 $\mathrm{d}x/\mathrm{d}a$ 相垂直，即点积

$$\nabla f \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}a} = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2}\right) \cdot \left(\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}a}, \frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}a}\right)$$

$$= \frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{dx_1}{da} + \frac{\partial y}{\partial x_2}\frac{dx_2}{da} = 0$$

因此可以与 2.1 节类似地得到

48

$$\frac{dy}{da} = \frac{\partial y}{\partial a} = - x_1^2$$

现在我们可以很容易地计算

$$S(y,a) = \frac{dy}{da} \cdot \frac{a}{y}$$

$$= -(3\ 846)^2 \frac{0.01}{532\ 308}$$

$$= -0.28.$$

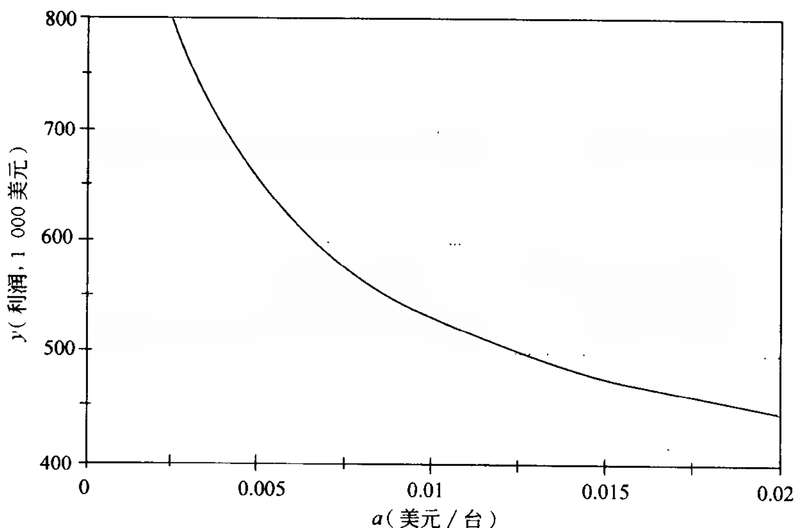


图 2-15　有约束的彩电问题中最优利润 y 关于价格弹性系数 a 的曲线图

同无约束问题一样，价格弹性系数的增加会导致利润的减少. 同样的，与无约束问题相同，几乎所有的利润损失都是由 19 英寸彩电的销售价格的降低所导致的. 如果 $a=0.011$，即使用 $x_1=3\ 846$，$x_2=6\ 154$ 来代替由(13)式求出的新的最优解，我们也不会有太多的利润损失. 梯度向量 ∇f 指向目标函数值即利润增加最快的方向. 现在我们不在最优点处，但从最优值点到点(3 846，6 154)的方向与 ∇f 垂直，从而我们可以预期 f 在这点的值与最优值相差不大. 因此，即使 a 有些小改变，我们的模型也可以给出非常接近最优值的解.

我们指出，对这个问题，使用计算机代数系统来完成需要的计算也是很有帮助的. 图 2-16 给出了利用计算机代数系统 MAPLE 计算灵敏性 $S(x_2, a)$ 的过程，其他灵敏性的计算也可以类似进行.

我们现在来考虑最优生产量 x_1，x_2 和相应的利润 y 关于每年可利用的生产

```
> y:=(339-a*x1-3*x2/1000)*x1
>    +(399-4*x1/1000-x2/100)*x2-(400000+195*x1+225*x2);
```

$$y := \left(339 - a x1 - \frac{3}{1000} x2\right) x1 + \left(399 - \frac{1}{250} x1 - \frac{1}{100} x2\right) x2 - 400000 - 195 x1 - 225 x2$$

```
> dydx1:=diff(y,x1);
```

$$dydx1 := -2 a x1 + 144 - \frac{7}{1000} x2$$

```
> dydx2:=diff(y,x2);
```

$$dydx2 := -\frac{7}{1000} x1 - \frac{1}{50} x2 + 174$$

```
> s:=solve({dydx1=lambda, dydx2 = lambda, x1+x2=10000},
  {x1, x2, lambda});
```

$$s := \left\{ x1 = \frac{50000}{1000\,a + 3},\ x2 = 20000 \frac{5000\,a - 1}{1000\,a + 3},\ \lambda = -52 \frac{500\,a - 11}{1000\,a + 3} \right\}$$

```
> assign(s);
> dx2da:=diff(x2,a);
```

$$dx2da := -\frac{10000000}{1000\,a + 3} - 20000000 \frac{500\,a - 1}{(1000\,a + 3)^2}$$

```
> assign(a=1/100);
> sx2a:=dx2da*(a/x2);
```

$$sx2a := \frac{25}{52}$$

```
> evalf(sx2a);
```

.4807692308

图 2-16 有约束的彩电问题中利用计算机代数系统 MAPLE 计算灵敏性 $S(x_2, a)$

能力 $c=10\ 000$(台)的灵敏性. 为完成这一工作，我们要在原始的问题中，将约束 $g=10\ 000$ 改写为更一般的形式 $g=c$. 现在的可行域与图 2-10 中所画的是类似的，只是那条斜的约束直线移动了一些(但仍平行于直线 $x_1+x_2=10\ 000$). 对在10 000附近的 c 值，最大值仍出现在约束直线

$$g(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = c \tag{16}$$

上满足 $\nabla f=\lambda\nabla g$ 的点处. 由于 ∇f 和 ∇g 都与原问题相同，没有任何改变，我们得到同一个拉格朗日乘子方程(12)式. 现在要与新的约束方程(16)式一起求解，得到 [49]

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{13c - 30\ 000}{26} \\ x_2 &= \frac{13c + 30\ 000}{26} \\ \lambda &= \frac{3(106\ 000 - 9c)}{2\ 000}. \end{aligned} \tag{17}$$

[50] 现在有

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}c} &= \frac{1}{2} \\
\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}c} &= \frac{1}{2}.
\end{aligned}
\tag{18}
$$

(18)式有一个简单的几何解释. 由于∇f指向f的值增加最快的方向，当我们移动(16)式中的约束直线时，新的极值点(x_1, x_2)近似地应该在∇f与(16)式的直线相交的位置. 这样我们有

$$S(x_1, c) = \frac{1}{2} \cdot \frac{10\ 000}{3\ 846} \approx 1.3$$

$$S(x_2, c) = \frac{1}{2} \cdot \frac{10\ 000}{6\ 154} \approx 0.8.$$

为得到y关于c的灵敏性，我们计算出

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}c} &= \frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}c} + \frac{\partial y}{\partial x_2}\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}c} \\
&= (24)\left(\frac{1}{2}\right) + (24)\left(\frac{1}{2}\right) \\
&= 24,
\end{aligned}
$$

这是拉格朗日乘子λ的值. 这时

$$S(y, c) = (24)\left(\frac{10\ 000}{532\ 308}\right) \approx 0.45.$$

$\mathrm{d}y/\mathrm{d}c$的几何解释是这样的：我们有$\nabla f = \lambda \nabla g$，当$c$增加时，在几何上为沿着$\nabla f$的方向向外移动. 在这个方向上移动时，$f$的增加速度是$g$的增加速度的$\lambda$倍.

导数$\mathrm{d}y/\mathrm{d}c = 24$有着很重要的实际意义. 每增加一个单位的生产能力$\Delta c = 1$，会带来的利润增加额为$\Delta y = 24$美元. 这称为*影子价格*. 它代表了对这个公司来说某种资源(生产能力)的价值. 如果公司有意提高自己的生产能力(这是最

[51] 关键的约束)，它会愿意付出每单位不超过24美元的价格来增加生产能力，另一方面，如果有某种新产品，它可以获得每单位超过24美元的利润，公司就会考虑将用于19英寸和21英寸立体声彩电的生产能力转而投产这种新产品. 也只有超过24美元，转产才是值得的.

这个问题中的灵敏性计算也可以使用计算机代数系统来完成. 图2-17给出了利用计算机代数系统MAPLE计算灵敏性$S(y, c)$的过程，其他灵敏性的计算也可以类似进行. 如果你有幸可以使用某个计算机代数系统，你也可以利用它来完成你自己的工作. 实际问题经常会涉及冗长的计算，使用计算机代数系统的方便快捷可以使你更有成效. 而且比起手算，它也要有意思得多.

```
> y:=(339-x1/100-3*x2/1000)*x1
>    +(399-4*x1/1000-x2/100)*x2-(400000+195*x1+225*x2);
```

$$y := \left(339 - \frac{1}{100}x1 - \frac{3}{1000}x2\right) x1 + \left(399 - \frac{1}{250}x1 - \frac{1}{100}x2\right)x2 - 400000 - 195x1 - 225x2$$

```
> dydx1:=diff(y,x1);
```

$$dydx1 := -\frac{1}{50}x1 + 144 - \frac{7}{1000}x2$$

```
> dydx2:=diff(y,x2);
```

$$dydx2 := -\frac{7}{1000}x1 - \frac{1}{50}x2 + 174$$

```
> s:=solve({dydx1=lambda, dydx2 = lambda, x1+x2=c},
  {x1, x2, lambda});
```

$$s := \left\{\lambda = -\frac{27}{2000}c + 159,\ x1 = \frac{1}{2}c - \frac{15000}{13},\ x2 = \frac{1}{2}c + \frac{15000}{13}\right\}$$

```
> assign(s);
> dydc:=diff(y,c);
```

$$dydc := -\frac{27}{2000}c + 159$$

```
> assign(c=10000);
> dydc;
```

$$24$$

```
> syc:=dydc*(c/y);
```

$$syc := \frac{78}{173}$$

```
> evalf(syc);
```

$$.4508670520$$

图 2-17 有约束的彩电问题中利用计算机代数系统 MAPLE 计算灵敏性 $S(y, c)$

在这个问题中，由于其他的约束条件：$x_1 \leqslant 5\,000$，$x_2 \leqslant 8\,000$ 都不是关键约束，最优利润 y 及生产量 x_1，x_2 对这些约束的系数当然一点都不敏感. x_1 或 x_2 的上界的一个小变化会改变可行域，但最优解仍为(3 846，6 154). 因此，这些资源的影子价格为零. 既然不需要，公司就不会愿意付出额外费用来提高立体声电视的电路板的数量. 除非 19 英寸彩电的电路板的数量减少到低于 3 846 或 21 英寸彩电的电路板的数量减少到低于 6 154，这种情况都不会改变. 在下一个例子中，我们会考虑这一问题.

例 2.5 设在有约束的彩电问题中(例 2.2)，可用的 19 英寸彩电的电路板只有每年 3 000 块. 这时最优的生产计划是什么?

在这种情况下，在 $x_1 + x_2 = 10\,000$ 上使 $f(x_1, x_2)$ 达最大值的原最优点落在了可行域之外. f 在可行域上的最大值点为(3 000，7 000). 这是约束线

$$g_1(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = 10\,000$$
$$g_2(x_1, x_2) = x_1 = 3\,000.$$

的交点．在此点，我们有

$$\nabla f = \lambda_1 \nabla g_1 + \lambda_2 \nabla g_2.$$

可以很容易地计算出在点(3 000，7 000)

$$\nabla f = (35,13)$$
$$\nabla g_1 = (1,1)$$
$$\nabla g_2 = (1,0)$$

52～53

于是 $\lambda_1=13$，$\lambda_2=22$．当然$\mathbb{R}^2$ 中的任何一个向量都可以写成(1，1)和(1，0)的线性组合．计算拉格朗日乘子的这个点，虽然满足双重约束，但仍代表了关键约束(生产能力和 19 英寸彩电电路板)的影子价格．换句话说，额外增加一单位的生产能力可多获利 13 美元，额外增加一单位的 19 英寸的电路板可多获利 22 美元.

为了读者阅读的方便，我们在这里给出拉格朗日乘子代表影子价格的一个证明．给定一个函数 $y=f(x_1，\cdots，x_n)$，在由一个或多个如下形式的约束方程定义的集合上求 f 的最优值.

$$g_1(x_1,\cdots,x_n) = c_1$$
$$g_2(x_1,\cdots,x_n) = c_2$$
$$\vdots$$
$$g_k(x_1,\cdots,x_n) = c_k.$$

假设最优值发生在点 x_0 处，在此点拉格朗日乘子定理的条件都是满足的．因此在 x_0，有

$$\nabla f = \lambda_1 \nabla g_1 + \cdots + \lambda_k \nabla g_k. \tag{19}$$

因为约束方程可以按任何顺序来写，只要证明 λ_1 是相应于第一个约束的影子价格就足够了．设 $x(t)$为集合 $g_1=t$，$g_2=c_2$，$\cdots$，$g_k=c_k$ 上的最优值点，因为 $g_1(x(t))=t$，我们有

$$\nabla g(x(t)) \cdot x'(t) = 1$$

特别地，有 $\nabla g(x_0) \cdot x'(c_1)=1$

由于对 $i=2$，$\cdots$，k，有 $g_i(x(t))=c_i$，即对任意 t 都是常数，从而有

$$\nabla g_i(x(t)) \cdot x'(t) = 0$$

特别地，有$\nabla g_i(x_0) \cdot x'(c_1)=0$

影子价格为在点 $t=c_1$ 的

$$\frac{\mathrm{d}(f(x(t)))}{\mathrm{d}t} = \nabla f(x(t)) \cdot x'(t)$$

由于(19)式在点 x_0 成立，我们就得到了所要证明的

$$\nabla f(x_0) \cdot x'(c_1) = \lambda_1 \nabla g_1(x_0) \cdot x'(c_1) = \lambda_1$$

2.4　习题

1．生态学家用下面的模型来反映两个竞争的种群的数量增长过程

$$\frac{dx}{dt}=r_1x\left(1-\frac{x}{K_1}\right)-\alpha_1xy$$

$$\frac{dy}{dt}=r_2y\left(1-\frac{y}{K_2}\right)-\alpha_2xy.$$

54

其中变量 x，y 为每个种群的数量. 参数 r_i 为每个种群的内禀增长率；K_i 为没有竞争时环境资源可容许的最大可生存的种群数量；α_i 为竞争的影响. 通过对蓝鲸和长须鲸的数量的研究，这些参数的值如下(时间 t 以年为单位)：

	蓝鲸	长须鲸
r	0.05	0.08
K	150 000	400 000
α	10^{-8}	10^{-8}

(a)采用五步方法和无约束优化模型确定使每年新出生鲸鱼的数量最多的种群数量 x，y.

(b)讨论最优种群数量关于内禀增长率 r_1，r_2 的灵敏性.

(c)讨论最优种群数量关于环境承载能力 K_1，K_2 的灵敏性.

(d)设 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$，这时如果出现某一种群灭绝的情况，是否还会是最优解？

2. 仍考虑习题 1 中的鲸鱼问题，但现在讨论鲸鱼的总数. 如果两种鲸鱼的数量 x，y 是非负的，我们就称其是可行的. 如果两种鲸鱼的增长率 dx/dt，dy/dt 是非负的，我们就称鲸鱼的种群数量是可持续的.

(a)采用五步方法和有约束优化模型求使鲸鱼总数 $x+y$ 达最大值的种群数量，要求满足种群数量是可行的和可维持的条件.

(b)讨论最优种群数量 x，y 关于内禀增长率 r_1，r_2 的灵敏性.

(c)讨论最优种群数量 x，y 关于环境承载能力 K_1，K_2 的灵敏性.

(d)设 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$，讨论最优种群数量 x，y 关于竞争强度 α 的灵敏性. 如果出现某一种群灭绝的情况，该种群数量是否还会是最优解？

3. 仍考虑习题 1 中的鲸鱼问题，但现在从经济方面讨论捕猎的问题.

(a)一头捕获的蓝鲸价值 12 000 美元，一头捕获的长须鲸的价值为蓝鲸的一半. 设有控制的捕猎可以使 x，y 维持一个理想的水平，求使总收入达极大的种群数量 x，y. (一旦种群数量达到了理想水平，通过使捕猎率与增长率相等，可以使种群数量保持一个常值.)要求采用五步方法和无约束优化模型.

55

(b)讨论最优种群数量 x，y 关于参数 r_1，r_2 的灵敏性.

(c)讨论收入(按美元/年)关于参数 r_1，r_2 的灵敏性.

(d)设 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$，讨论 x，y 关于 α 的灵敏性. 什么情况下使某一种群灭绝时在经济上可达最优？

4. 在习题 1 中，假设国际捕鲸协会(IWC)颁布了法令，不能使鲸鱼的数量低于最大可生存的种群数量 K 的一半，否则将无法维持其种群数量.

(a)采用拉格朗日乘子法求在这些约束下使可持续收入达极大的最优种群数量.

(b)讨论最优种群数量 x，y 和可持续收入关于约束系数的灵敏性.

(c)IWC 认为最小种群数量的规定按限额捕捞的方式更容易完成. 请给出一个与 $K/2$ 的规定等价的限额(即每年可以捕猎的蓝鲸和长须鲸的最大数量).

(d)捕鲸者抱怨 IWC 的限额使他们花费的资金太多，他们请求放宽限制. 试分析提高限额对捕鲸者的年收入和鲸鱼的种群数量的可能的影响.

5. 考虑例 2.1 中的无约束的彩电问题. 由于公司的装配厂在海外，美国政府要对每台电视征收 25 美元的关税.

(a)将关税考虑进去，求最优生产量. 这笔关税会使公司有多少花费？在这笔花费中，有多少是直接付给政府，又有多少是销售额的损失？

(b)为了避免关税，公司是否应该将生产企业重新定址在美国本土上？假设海外的工厂可以按每年 200 000 美元的价格出租给另一家制造公司，在美国国内建设一个新工厂并使其运转起来需要花费每年 550 000 美元. 这里建筑费用按新厂的预期使用年限分期偿还.

(c)征收关税的目的是为了促使制造公司在美国国内建厂. 能够使公司愿意在国内重新建厂的最低关税额是多少？

(d)将关税定得足够高，使公司要重建工厂. 讨论生产量和利润关于关税的灵敏性，说明实际关税额的重要性.

56

6. 一家个人计算机的制造厂商现在每个月售出 10 000 台基本机型的计算机. 生产成本为 700 美元/台. 批发价格为 950 美元/台. 在上一个季度中，制造厂商在几个作为试验的市场将价格降低了 100 美元，其结果是销售额提高了 50%. 公司在全国为其产品做广告的费用为每个月 50 000 美元. 广告代理商宣称若将广告预算每个月提高 10 000 美元，会使每个月的销售额增加 200 台. 管理部门同意考虑提高广告预算到最高不超过 100 000 美元/月.

(a)利用五步方法求使利润达最高的价格和广告预算. 使用有约束优化模型和拉格朗日乘子法求解.

(b)讨论决策变量(价格和广告费)关于价格弹性系数(数据 50%)的灵敏性.

(c)讨论决策变量关于广告商估计的每增加 10 000 美元/月的广告费，可多销售 200 台这一数据的灵敏性.

(d)(a)中求出的乘子的值是多少？它的实际意义是什么？你如何利用这一信息来说服最高管理层提高广告费用的最高限额？

7. 某家地方日报最近被一家大型媒体集团收购. 报纸现在的售价为 1.5 美元/周，发行量为 80 000 家订户. 报纸广告的价格为 250 美元/页，现在售出 350 页/周(即 50 页/天). 新的管理方正在寻求提高利润的方法. 据估计，报纸的订阅价格提高 10 美分/周，会导致订户数下降 5 000. 报纸广告价格提

高 100 美元/页，会导致每周约 50 页广告的损失. 广告的损失又会影响发行量，因为人们买报纸的一个原因就是为了看广告. 据估计，每周损失 50 页广告会使发行量减少 1 000.

(a)利用五步方法和无约束优化模型求使利润最大的报纸订阅价格和广告价格.

(b)对你在(a)中求出的结果讨论关于价格提高 10 美分导致销售量下降 5 000 这一假设的灵敏性.

(c)对你在(a)中求出的结果讨论关于广告价格提高 100 美元/页导致广告损失 50 页/周这一假设的灵敏性.

57

(d)现在在报纸上登广告的广告商可以选择直接将广告邮寄给它的客户. 直接邮寄的花费相当于 500 美元/页的报纸广告费用. 这一情况会如何影响你在(a)中得出的结论?

8. 仍考虑习题 7 中的报纸问题. 现在假设广告商可以选择直接将广告邮寄给它的客户. 由于这一点，管理方决定广告价位的提高不超出 400 美元/页的价格.

(a)采用五步方法和有约束优化模型求使利润最大的报纸每周订阅价格和广告价格. 利用拉格朗日乘子法求解.

(b)讨论你的决策变量(订阅价格和广告价格)关于价格提高 10 美分会导致销售量下降 5 000 这一假设的灵敏性.

(c)讨论你的两个决策变量关于广告价格提高 100 美元/页导致广告损失 50 页/周这一假设的灵敏性.

(d)(a)中求出的拉格朗日乘子的值是多少? 从利润关于 400 美元/页这一假设的灵敏性的角度解释这一数据的意义.

9. 仍考虑习题 7 中的报纸问题. 但现在考虑报纸的经营开支. 现在每周的经营开支为包括 80 000 美元付给编辑部门(新闻、特写、编辑)，30 000 美元付给销售部门(广告)，30 000 美元付给发行部门，60 000 美元为固定消耗(抵押、公用事业股票、运转经营). 新的管理方正在考虑削减编辑部门的开支. 据估计，报纸在最低 40 000 美元的编辑预算的条件下可以维持经营. 减少编辑预算可以节约经费，但会影响报纸的质量. 根据在其他市场的经验，每减少 10%的编辑预算，会损失 2%的订户和 1%的广告. 管理方也在考虑提高销售的预算. 最近，在一个类似的市场上另一家报纸的管理者将其广告销售预算提高了 20%，结果多获得了 15%的广告. 销售预算可以提高到最多 50 000 美元/周，但总的经营开支不能超过现在的 200 000 美元/周的水平.

(a)设订阅价格保持 1.5 美元/周，广告的价格为 250 美元/页. 采用五步方法和有约束优化模型求使利润最大的编辑和销售预算. 利用拉格朗日乘子法求解.

(b)计算每一个约束的影子价格，解释它们的含义.

[58]

(c)画出这个问题的可行域. 在图上指出最优解的位置. 在最优解处，哪一个约束是关键约束. 它与影子价格的联系是什么?

(d)假设编辑预算的削减在市场上产生了相当强烈的负作用. 设减少10%的编辑预算导致报纸损失 p%的广告和 $2p$%的订户. 确定最小的 p 值使得如果不减少编辑预算，报纸的盈利情况反而要好些.

10. 一个运输公司每天有100吨的航空运输能力. 公司每吨收空运费250美元. 除了重量的限制外，由于飞机货舱的容积有限，公司每天只能运50 000立方英尺[○]的货物. 每天要运输的货物数量如下

货物	重量(吨)	体积(立方英尺 / 吨)
1	30	550
2	40	800
3	50	400

(a)采用五步方法和有约束优化模型求使利润最大的每天航空运输的各种货物的吨数. 利用拉格朗日乘子法求解.

(b)计算每个约束的影子价格，解释它们的含义.

(c)公司有能力对它的一些旧的飞机进行改装来增大货运区域的空间. 每架飞机的改造要花费200 000美元，可以增加2 000立方英尺的容积. 重量限制仍保持不变. 假设飞机每年飞行250天，这些旧飞机剩余的使用寿命约为5年. 在这种情况下，是否值得进行改装? 有多少架飞机时才值得改装?

2.5 进一步的阅读文献

Beightler, C., Phillips, D., and Wilde, D. (1979). *Foundations of Optimization*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Courant, R. (1937). *Differential and Integral Calculus*, Vol. II, Wiley, New York.

Edwards, C. (1973). *Advanced Calculus of Several Variables*, Academic Press, New York.

Hundhausen, J. and Walsh, R. *The Gradient and Some of Its Applications*, UMAP module 431.

Hundhausen, J. and Walsh, R. *Unconstrained Optimization*, UMAP module 522.

Nevison, C. *Lagrange Multipliers: Applications to Economics*, UMAP module 270.

Nievergelt, Y. *Price Elasticity of Demand: Gambling, Heroin, Marijuana, Whiskey, Prostitution, and Fish*, UMAP module 674.

[59 ~ 60]

Peressini, A. *Lagrange Multipliers and the Design of Multistage Rockets*, UMAP module 517.

○ 1立方英尺=0.028m³

第3章 最优化计算方法

在前面几章中讨论了求解最优化问题的一些解析方法. 这些方法构成了大多数优化模型的基础. 本章我们要研究一些在实际应用中出现的计算问题，并讨论一些处理它们的最常见的方法.

3.1 单变量最优化

即使是简单的单变量最优化问题，确定全局的最优值点的工作也可能是极其困难的. 实际问题通常都很麻烦. 即使我们讨论的函数是处处可微的，导数的计算也经常是复杂的. 然而，最糟糕的部分是求解方程$f'(x)=0$. 一个清楚而简单的事实就是绝大多数方程是无法解析求解的. 在大多数情况下，我们所能做得最好的就是利用图像或数值方法求一个近似解.

例 3.1 再来考虑例 1.1 中的售猪问题. 但现在考虑到猪的生长率不是常数的事实. 假设现在猪还小，因此生长率是增加的. 什么时候应该将猪售出从而获得最大的收益?

我们将采用五步方法. 第一步要将我们在 1.1 节中所做的工作(汇总在图 1-1中)修改一下. 现在我们不能再假设 $w=200+5t$. 那么怎样才是对增加的生长率的一个合理的假设呢? 这个问题当然有很多可能的答案. 这里让我们来假设猪的生长率正比于它的重量. 也就是说，我们假设 61

$$\frac{dw}{dt} = cw. \tag{1}$$

根据 $w=200$ 磅时 $dw/dt=5$ 磅/天的事实，我们可得出 $c=0.025$. 这样我们得到了一个简单的微分方程来解出 w. 这个方程是

$$\frac{dw}{dt} = 0.025w, \quad w(0) = 200. \tag{2}$$

我们可以用分离变量法来求解方程(2)，得到

$$w = 200e^{0.025t}. \tag{3}$$

62

由于我们在图 1-1 中列出的所有其他假设都不变，这样第一步就完成了.

第二步为选择一个建模方法. 我们采用单变量最优化模型. 单变量最优化模型的一般求解过程已经在 1.1 节中做了介绍. 本节我们要探究一些可以用于实现这个一般求解过程的计算方法. 在实际问题中，当计算很困难或手算很繁琐时数值计算方法经常要用到，比如我们这里要介绍的方法.

第三步是推导模型的公式. 现在的问题与 1.1 节中得到的公式惟一不同的就是我们要将重量方程 $w=200+5t$ 替换为方程(3). 这样就得到了一个新的目标函数

$$
\begin{aligned}
y &- f(x) \\
&= (0.65 - 0.01x)(200e^{0.025x}) - 0.45x,
\end{aligned} \tag{4}
$$

我们的问题为在集合 $S=\{x : x\geqslant 0\}$ 上求(4)式中的函数的最大值.

第四步是求解这个模型. 我们采用图像法. 个人计算机(IBMPC、兼容机、Macintosh 等)上使用的好的图形软件及图形计算器是很容易获得的. 我们对这个问题的图像分析从按与图 1-2 相同的尺度画出(4)式中的方程的图像开始. 图 1-2 中画出的是开始的目标函数. 在现在的问题中，我们可以从目标函数的图像中看出更多的内容. 我们要说图 3-1 不是函数在集合 $S=\{0, \infty\}$ 上的完整图像，图 3-2 才是完整图像，它显示了解决这个问题所需要的所有重要特征. 我们如何知道何时得到了一个完整图像呢？这个问题没有一个简单的答案. 图像法是一种探索方法，要经过实验并运用正确的判断. 这里我们当然不需要考虑取负值的 x，但同时对 $x=65$ 之外的点也不需要考虑. 在这个点之后猪的价格是负的，这显然没有意义.

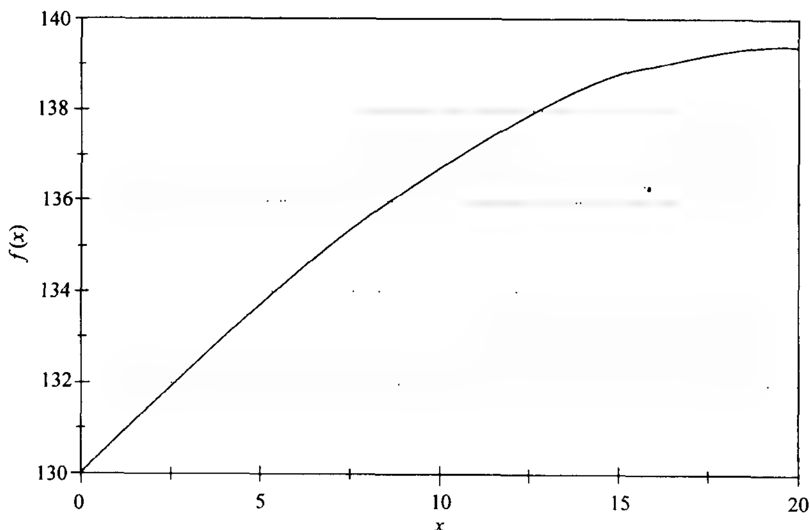


图 3-1　非线性增重模型下的售猪问题的净收益 $f(x)$ 关于售猪时间 x 的图像
$f(x)=(0.65-0.01x)(200e^{0.025x})-0.45x$

从图 3-2 中我们可以得出结论，最大值发生在 $x=20$ 附近，此时 $y=f(x)=140$. 为得到一个更好的估计，我们可以把图像上的最大值附近放大来看. 图 3-3、图 3-4 为逐次放大的结果. 由图 3-4，我们可以估计出最大值发生在

63

$$
\begin{aligned}
x &= 19.5 \\
y &= f(x) = 139.395.
\end{aligned} \tag{5}
$$

这里我们得到的最大值点的位置 x 有三位有效数字，相应的最大值有六位有效数字. 由于在最大值点 $f'(x)=0$，函数 $f(x)$ 在这一点附近关于 x 的变化很不敏感.

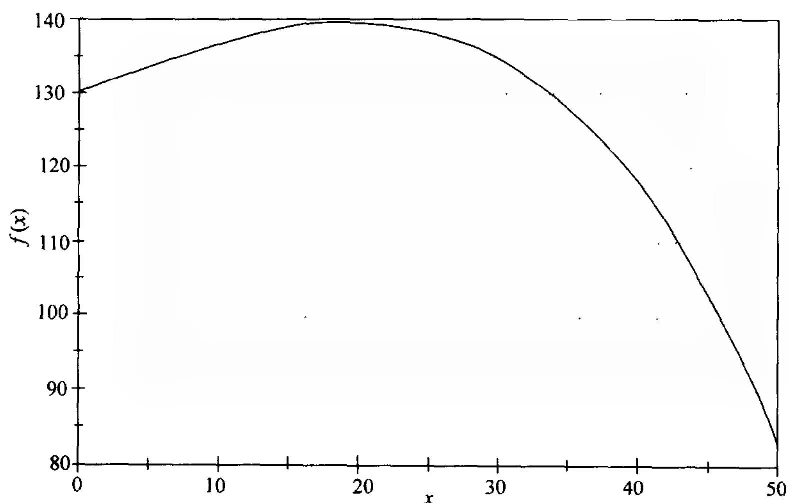


图 3-2　非线性增重模型下的售猪问题的净收益 $f(x)$ 关于售猪时间 x 的完整图像 $f(x)=(0.65-0.01x)(200e^{0.025x})-0.45x$

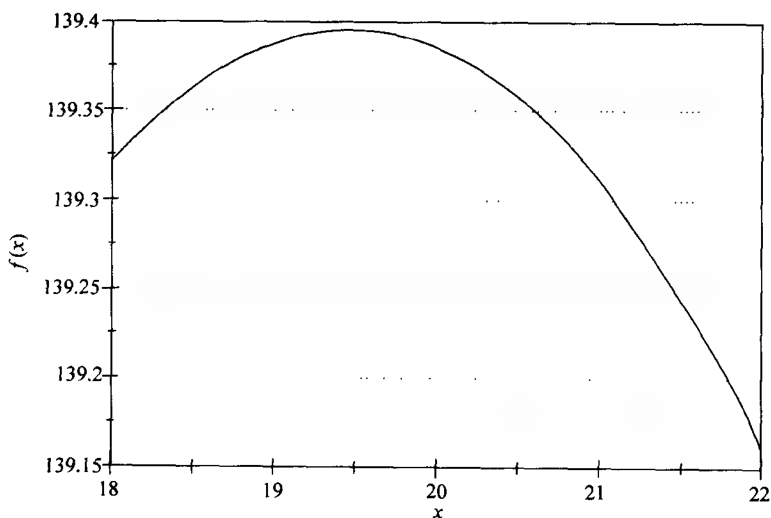


图 3-3　非线性增重模型下的售猪问题的净收益 $f(x)$ 关于售猪时间 x 的第一次放大图像 $f(x)=(0.65-0.01x)(200e^{0.025x})-0.45x$

因此我们可以得到比 x 有更高精确度的 $f(x)$.

第五步是回答问题. 在考虑到小猪的生长率还在增加之后，我们现在建议等待 19 到 20 天再将猪卖出. 这样会得到将近 140 美元的净收益.

在第四步中用图像法确定出最大值点的位置(见(5)式)没有很高的精确度. 这对现在的问题是可以接受的，因为我们并不需要更高的精确度. 虽然图像法确

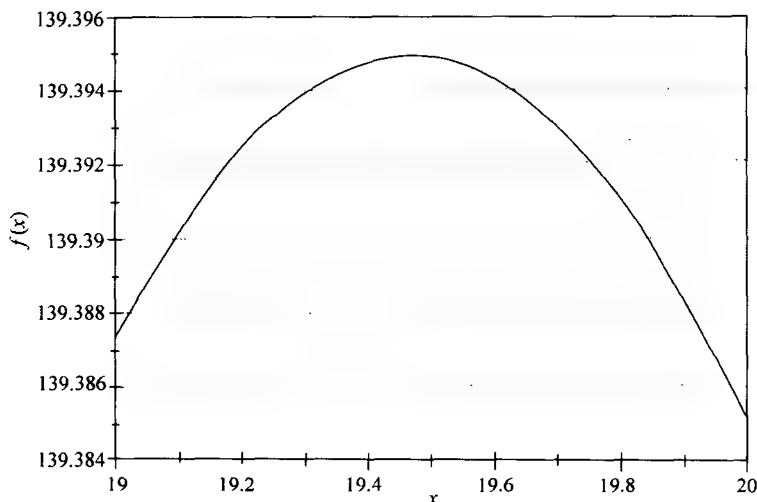


图 3-4　非线性增重模型下的售猪问题的净收益 $f(x)$关于售猪时间 x 的第二次放大图像 $f(x)=(0.65-0.01x)(200e^{0.025x})-0.45x$

[64] 实可以给出高精度的结果(通过在极值点反复放大)，但这种情况下我们应该采用更有效的计算方法．我们会在后面的灵敏性分析中介绍一些方法．

现在来讨论(5)式中给出的最优点的坐标和最优值关于小猪的增长率 $c=0.025$ 的灵敏性．一种方法是对几个不同的参数 c 的值重复我们前面做的图像分析的工作．但这太繁琐．我们将采用一个更有效的方法．

我们从将模型一般化开始．现在假设

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=cw,\quad w(0)=200, \tag{6}$$

于是

$$w=200e^{ct}. \tag{7}$$

这样得到目标函数为

[65]

$$f(x)=(0.65-0.01x)(200e^{cx})-0.45x. \tag{8}$$

根据我们的图像分析，我们知道对 $c=0.025$，最大值出现在 $f'(x)=0$ 的内临界点处．由于 f 是 c 的连续函数，看起来对 0.025 附近的 c 得出同样的结论是合理的．为了确定这一内临界点的位置，需要计算导函数 $f'(x)$并求解方程 $f'(x)=0$．这个过程的第一部分(计算导数)相对比较容易，可以使用计算导数的标准方法．这一方法大家在一元微积分中已经学过了．事实上，它可以应用于任意可微函数．对表达式复杂的函数，也可以利用某个计算机代数系统(MAPLE，MATHEMATICA，DERIVE 等)，或某个图形计算器(如 HP-48)．在我们的问题中，不难用手算得出

$$f'(x)=200ce^{cx}(0.65-0.01x)-2e^{cx}-0.45. \tag{9}$$

整个过程的第二部分是解方程：

$$200ce^{\alpha x}(0.65-0.01x)-2e^{\alpha x}-0.45=0. \tag{10}$$

66

你可以试着用手算求解，但你不太可能得到一个解析解．一些计算机代数系统现在可以利用专门设计用来求解这类方程的 W 函数来求解(10)．随着数学及数学软件的发展，我们求解方程的能力会逐渐增加，但绝大多数方程无法用代数方法求解仍是显而易见的．虽然有一般的代数方法来计算导数，但没有一般的代数方法来解方程．甚至对于多项式，我们知道，对于五次或高于五次的多项式是不可能使用通用的代数方法来求解的(即没有类似于二次方程那样的求根的公式)．这就是为什么常常必须要借助于数值近似方法来求解代数方程．

我们要用牛顿法解方程(10)．你很可能已经在一元微积分中学习过牛顿法．

给定一个可微函数 $F(x)$及一个 $F(x)=0$ 的根的近似点 x_0．牛顿法采用线性近似．在点 $x=x_0$ 附近用通常的切线近似，则有 $F(x)\approx F(x_0)+F'(x_0)(x-x_0)$．为得到 $F(x)=0$ 的实际根的一个更好的近似 $x=x_1$，我们令 $F(x_0)+F'(x_0)(x-x_0)=0$，解出 $x=x_1$，则得到 $x_1=x_0-F(x_0)/F'(x_0)$．从几何上看，点 $x=x_0$ 处对 $y=F(x)$的切线与 x 轴在点 $x=x_1$ 相交．只要 x_1 离 x_0 不太远，切线近似就相当好，从而 x_1 就接近真正的根．牛顿法反复用切线近似，给出对真解的一系列精度不断提高的近似值．一旦与根充分接近，牛顿法每次迭代给出的近似值的准确数位都会是上一次的近似值的准确数位的两倍．

图 3-5 用我们称之为伪代码的形式给出了牛顿法的算法．这是描述一个数值算法的标准方法．将伪代码转化为可在计算机上直接运行的高级计算机语言程序(BASIC，FORTRAN，C，PASCAL 等)是非常容易的，也可以用电子数据表格软件来实现伪代码．在绝大多数计算机代数系统上也能够进行编程．对本书中介绍的数值方法，这些方法都是可行的．我们不推荐用手算完成这些算法．

```
算法：牛顿法
变量：x(n)=n 次迭代后的根的近似解
      N=迭代次数
输入：x(0)，N
过程：开始
      对 n=1 到 N 循环
      开始
      x(n)←x(n−1)−F(x(n−1))/F′(x(n−1))
      结束
      结束
输出：x(N)
```

图 3-5　单变量牛顿法的伪代码

[67] 在我们的问题中，我们采用牛顿法来求方程

$$F(x) = 200ce^{cx}(0.65 - 0.01x) - 2e^{cx} - 0.45 = 0. \tag{11}$$

的根．对接近 0.025 的 c，我们期望能找到在 $x=19.5$ 附近的根．我们将牛顿法的计算机计算结果列在表 3-1 中．对每一个 c 值都以 $x(0)=19.5$ 为初始点，进行 $N=10$ 次迭代．为了检验计算结果的精确性，我们又对迭代次数 $N=15$ 的情形进行了计算．

表 3-1　非线性增重模型下的售猪问题的最佳售猪时间 x 关于生长率参数 c 的灵敏性

c	x	c	x
0.022	11.626 349	0.026	21.603 681
0.023	14.515 929	0.027	23.550 685
0.024	17.116 574	0.028	25.332 247
0.025	19.468 159		

[68]

注意解方程(11)的方法包括两步．第一步用某种*全局方法*(图像法)确定近似解，第二步用一种快速收敛的*局部方法*求得满足精度要求的精确解．这是数值求解的两个阶段，它在大多数常用的求解方法中是很普遍的．对单变量最优化问题，图像法是最简单也最实用的全局方法．牛顿法易于用程序实现，而且在大多数图形计算器、电子数据表格软件和计算机代数系统中都有内置的解方程工具．虽然在细节上有所不同，这些求解工具大多数都是以牛顿法的某些变形为基础的．它们可以像牛顿法一样安全、有效地使用．求解时首先要用某个全局方法求根的近似值，大多数这类解方程工具都要求一个根的初始估计值或一个包含根的初始区间．然后利用此工具求出根，并验证结果．验证可以采用对参数的容许值进行灵敏性分析，或将求出的解代回到原始的方程中．注意：对数值求解的结果轻易的和不加鉴别的信任是危险的．对许多实际问题，包括本书中的一些练习题，不恰当地应用数值求解工具能导致很严重的误差．初始时选用一个适当的全局方法及随后对根的验证都是数值求解过程的重要部分．一些计算器、计算机代数系统及电子数据表格软件也具有数值最优化工具，通常其程序都采用变形的牛顿法，这是建立在对导数的数值逼近的基础上的．对这些程序我们也有同样的建议：首先采用一个全局方法估计最优解的近似值，然后用数值最优化工具求解，最后对参数的容许值进行灵敏性分析，以保证结果的精确度．

为了将灵敏性分析的结果与问题的原始数据相联系，我们在图 3-6 中画出了表示最优售猪时间的根 x 关于增长率

$$g = 200c, \tag{12}$$

的曲线．这里初始给出的增长率为 $g=5$ 磅/天．为得到对灵敏性的数值估计．我们取 $c=0.025\ 25$(原始 $c=0.025$ 的 1%的增加)再来求解一次方程(11)．此时求出的解为

[69]

$$x = 20.021\ 136,$$

这表示 x 增加了 2.84%，我们由此估计出 $S(x, c)=2.84$．根据

$$g = 200c,$$

我们很容易说明：

$$S(x,g) = S(x,c) = 2.84.$$

如果令 h 为猪的初始重量(我们假设 $h=200$ 磅)，由

$$h = \frac{5}{c},$$

我们有

$$\begin{aligned} S(x,h) &= \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}h} \cdot \frac{h}{x} \\ &= \left(\frac{\mathrm{d}x/\mathrm{d}c}{\mathrm{d}h/\mathrm{d}c}\right)\left(\frac{5/c}{x}\right) \\ &= -S(x,c) = -2.84. \end{aligned}$$

70

事实上，如果 y 正比于 z，总有

$$S(x,y) = S(x,z), \tag{13}$$

而如果 y 反比于 z

$$S(x,y) = -S(x,z). \tag{14}$$

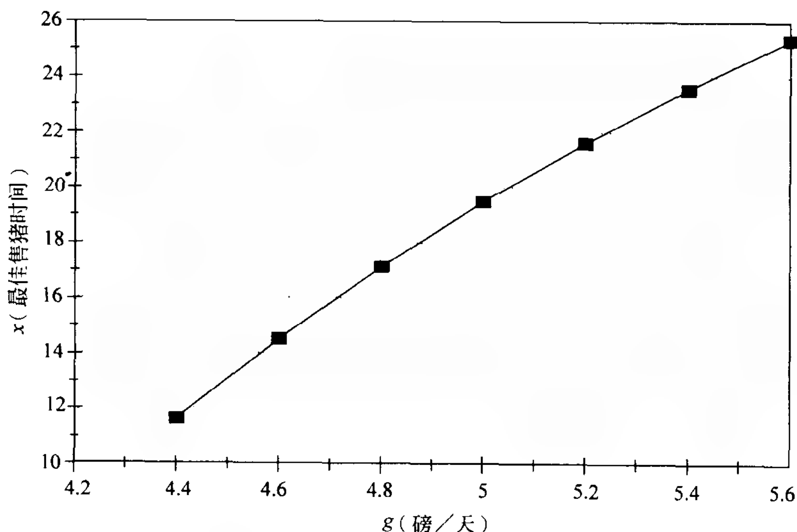


图 3·6　非线性增重模型下的售猪问题的最佳售猪时间 x 关于生长率 g 的图像

现在我们已经求出了 x 关于猪的初始重量和增长率的灵敏性. 其他的灵敏性与第 1 章中讨论的原始问题是相同的，这是因为目标函数关于其中的其他参数的出现形式都没有变化.

现在得到的最优解与第 1 章中给出的解有显著的不同(现在为 19 到 20 天，而第 1 章中为 8 天)，这使得对我们模型的稳健性有很大的疑问. 假设

$$p = 0.65 - 0.01t$$

是否在三周的时间内一直成立也是需要认真考虑的问题．关于价格的其他模型当然也应该与一头有代表性的猪的生长过程的更复杂模型一同考虑．在本章最后的练习中涉及了一些关于稳健性的内容．我们现在能够说的就是：如果猪的生长率不下降，如果价格下降的速度不加快，我们就应当将猪再多养一个星期．到那时，我们将以新的数据为基础重新讨论．

3.2 多变量最优化

关于一个多元函数求其整体最优值点的实际问题与上一节讨论的问题在很多地方都是相似的．由于维数的增加，问题的复杂度也增加了．对维数 $n>3$ 的情况，图像法已不再适用．对方程 $\nabla f=0$ 的求解也由于独立变量个数的增加变得很复杂．有约束的最优化问题由于可行域的几何形状可能很复杂，求解也更为困难．

例 3.2 一个城郊的社区计划更新他们的消防站．原来的消防站设置在历史上的市中心．城市规划人员要将新的消防站设置得更科学合理．对响应时间数据的统计分析给出：对离救火站 r 英里处打来求救电话，需要的响应时间估计为 $3.2+1.7r^{0.91}$ 分钟．（第 8 章的习题 16、17 涉及了推导此公式的内容．）图 3-7 中给出了从消防官员处得到的从城区的不同区域打来的求救电话频率的估计数据．其中每一格代表一平方英里[○]，格内的数字为每年从此区域打来的紧急求救电话的数量．求新的消防站的最佳位置．

71

3	0	1	4	2	1
2	1	1	2	3	2
5	3	3	0	1	2
8	5	2	1	0	0
10	6	3	1	3	1
0	2	3	1	1	1

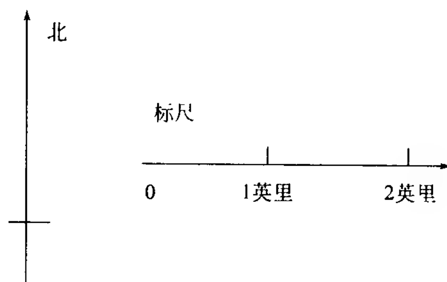


图 3-7 城区的每一平方英里区域每年的发生的紧急呼救次数地图

○ 1 平方英里 $=2.590\times10^6\,m^2$

我们用(x, y)坐标来标记城区的地图上的位置．其中 x 为按英里到城市西部边界的距离，y 为按英里到南部边界的距离．例如，(0，0)为地图的左下角，(0，6)为地图的左上角．为简单起见，我们将此城区划分为 9 个 2×2 平方英里的正方形子区域，并假设每一次紧急呼救都发生在正方形的中心．如果(x, y)是新的消防站的位置．对求救电话的平均响应时间为 $z=f(x, y)$，其中

$$
\begin{aligned}
z =3.2 + 1.7[&6\sqrt{(x-1)^2+(y-5)^2}^{0.91} \\
&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-5)^2}^{0.91}+8\sqrt{(x-5)^2+(y-5)^2}^{0.91} \\
&+21\sqrt{(x-1)^2+(y-3)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-3)^2+(y-3)^2}^{0.91} \\
&+3\sqrt{(x-5)^2+(y-3)^2}^{0.91}+18\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}^{0.91} \\
&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-1)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-5)^2+(y-1)^2}^{0.91}]/84.
\end{aligned}
\tag{15}
$$

问题为在区域 $0\leqslant x\leqslant 6$，$0\leqslant y\leqslant 6$ 上对 $z=f(x, y)$求最小值．

72
~
73

图 3-8 为目标函数 f 在可行域上的三维图像．该图显示 f 在$\nabla f=0$ 的惟一内点达到最小值．图 3-9 为 f 的水平集的等值线图，显示了$\nabla f=0$ 发生在点 $x=2$，

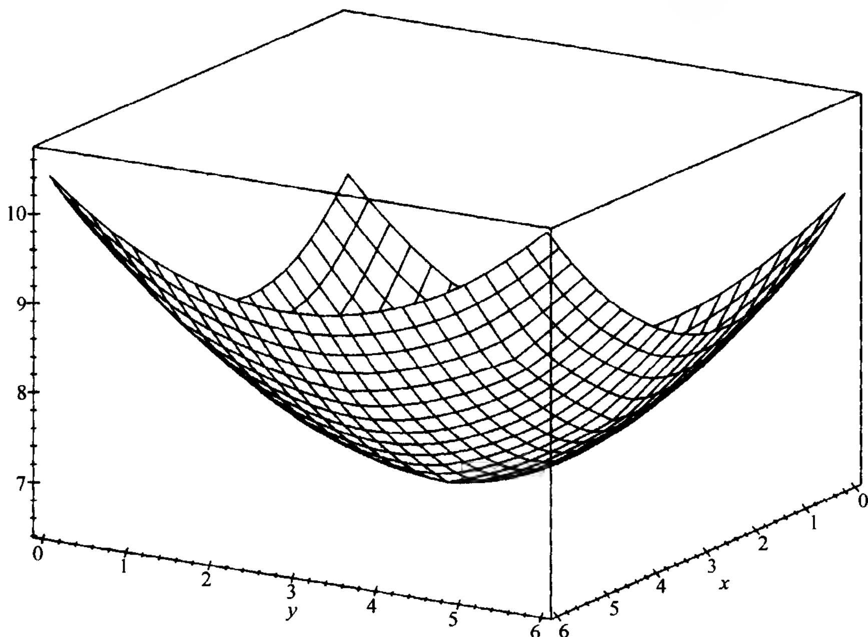


图 3-8　消防站位置问题中平均响应时间 $z=f(x, y)$关于地图位置(x, y)的三维图像

$$
\begin{aligned}
f(x, y)=3.2+1.7[&6\sqrt{(x-1)^2+(y-5)^2}^{0.91} \\
&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-5)^2}^{0.91}+8\sqrt{(x-5)^2+(y-5)^2}^{0.91} \\
&+21\sqrt{(x-1)^2+(y-3)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-3)^2+(y-3)^2}^{0.91} \\
&+3\sqrt{(x-5)^2+(y-3)^2}^{0.91}+18\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}^{0.91} \\
&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-1)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-5)^2+(y-1)^2}^{0.91}]/84
\end{aligned}
$$

$y=3$ 附近．对此问题当然可以计算出∇f，但$\nabla f=0$ 则无法代数求解．进一步的图像分析是可以的，但对多于一个变量的函数进行图像分析是非常麻烦的．我们这里需要的是用一个简单的全局方法对最小值点给出一个估计．

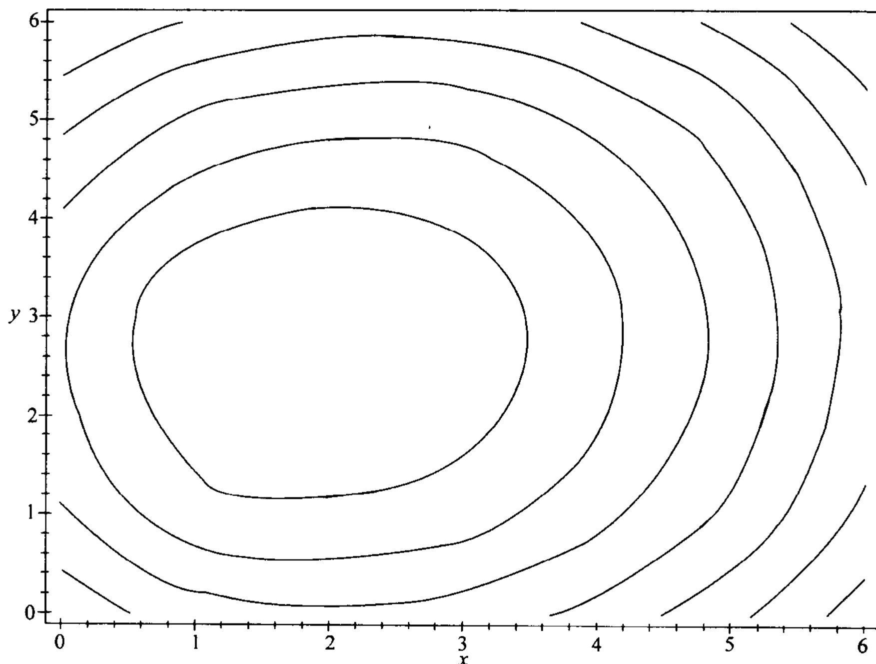


图 3-9　消防站位置问题中平均响应时间 $z=f(x, y)$关于地图位置(x, y)的等值线图

$$\begin{aligned}f(x, y)=3.2+1.7[&6\sqrt{(x-1)^2+(y-5)^2}^{0.91}\\&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-5)^2}^{0.91}+8\sqrt{(x-5)^2+(y-5)^2}^{0.91}\\&+21\sqrt{(x-1)^2+(y-3)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-3)^2+(y-3)^2}^{0.91}\\&+3\sqrt{(x-5)^2+(y-3)^2}^{0.91}+18\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}^{0.91}\\&+8\sqrt{(x-3)^2+(y-1)^2}^{0.91}+6\sqrt{(x-5)^2+(y-1)^2}^{0.91}]/84\end{aligned}$$

图 3-10 为随机搜索算法．这种最优化方法只是随机地在可行域上选取 N 个点，选择其中使目标函数的值达最小的点．记号随机数$\{S\}$表示在集合 S 中随机选取的一个点．取 $a=0$，$b=6$，$c=0$，$d=6$ 及 $N=1\ 000$，对(15)式中的函数采用随机搜索算法，用计算机实现，得到最小值点的近似值为：

$$\begin{aligned}x\ \min &= 1.66\\ y\ \min &= 2.73\\ z\ \min &= 6.46.\end{aligned}\tag{16}$$

由于该算法采用了随机数，输入同样数据，再一次执行此程序可能会得到略有不同的解．随机搜索的精确程度与 N 个点在整个可行域上按均匀网格分布的情况

74

大致相当. 这样的网格应该有 32×32 个网格点($32^2\approx 1\ 000$)，因此在 x 和 y 方向上的精度都约为 $6/32\approx 0.2$. 由于在最小点有 $\nabla f=0$，我们得到的 z 的精度会高很多. 随机搜索之外的另一种方法是格点搜索(在 N 个等距节点处检查 $z=F(x, y)$). 格点搜索方法的性能基本上与随机搜索相同，但随机搜索方法更灵活，也更容易实现.

75

```
算法: 随机搜索方法
变量: a=x 的下限
      b=x 的上限
      c=y 的下限
      d=y 的上限
      N=迭代次数
      xmin=最小点 x 坐标的近似解
      ymin=最小点 y 坐标的近似解
      zmin=最小点 F(x, y)值的近似解
输入: a, b, c, d, N
过程: 开始
      x←Random{[a, b]}
      y←Random{[c, d]}
      z min←F(x, y)
      对n=1 到 N 循环
        开始
        x←Random{[a, b]}
        y←Random{[c, d]}
        z←F(x, y)
        若 z<z min, 则
        x min←x
        y min←y
        z min←z
        结束
        结束
输出: x min, y min, z min
```

图 3-10　随机搜索方法的伪代码

(16)式中的最小点位置(1.7, 2.7)及相应的平均响应时间 6.46 分钟的估计值是由在可行域中取 $N=1\ 000$ 个随机点对目标函数求值得到的. 增加 N 会得到更高精度的解. 但这一简单的全局方法的特性并不适于通过增加 N 来提高精度. 解每多增加一位小数的精确度，就要求 N 扩大 100 倍. 因此这一方法只适于得到最优解的一个粗略的近似. 对我们现在的问题，这样求出的解已经足够好了. 由于我们在前面为简化所做的假设，消防站的位置有 1 英里的误差，因此现在要求更高的精度是没有必要的. 可以给出一个足够近似的答案为：消防站的位置应该在地图上的(1.7, 2.7)附近，这样平均的响应时间约为 6.5 分钟. 准确的位置要受一些模型中没有体现的因素的影响，如道路的位置，在最佳位置所在区域的可用土地情况等.

76

对响应时间关于最终给出的消防站位置的灵敏性做出估计是非常重要的．由于在最优点有$\nabla f=0$，我们不期望f在(1.7，2.7)附近有太大的变化．为得到f关于最优点附近的(x, y)的灵敏性的一个具体的结果，我们将x，y的范围改为$1.5\leqslant x\leqslant 2$，$2.5\leqslant y\leqslant 3$，$f$改为$-f$，再一次运行随机搜索程序．取$N=100$，得到$f$在这个区域的最大值约为6.49分钟，或者说大约比观察到的最优时间长0.03分钟．这对在此边长半英里的正方形区域内哪一点设置消防站的实际应用不会有什么影响．

上述例子中采用的随机搜索方法虽然简单，但较慢．对一些要求更高精度的问题，则不适于采用这一方法．如果涉及的函数像例3.2中的目标函数一样复杂，用这种方法很难求得精确的解．更精确、更有效地求解多变量函数的整体最优化问题的方法绝大多数都以梯度为基础．对我们下面讨论的例子，由于梯度很容易计算，用这些方法更容易处理．

例3.3　一家草坪家具的生产厂生产两种草坪椅．一种是木架的，一种是铝管架的．木架椅的生产价格为每把18美元，铝管椅为每把10美元．在产品出售的市场上，可以售出的数量依赖于价格．据估计，若每天欲售出x把木架椅，y把铝管椅，木架椅的出售价格不能超过$10+31x^{0.5}+1.3y^{-0.2}$美元/把，铝管椅的出售价格不能超过$5+15y^{-0.4}+0.8x^{0.08}$美元/把．求最优的生产量．

目标为在生产量的可行域$x\geqslant 0$，$y\geqslant 0$上对利润函数$z=f(x, y)$(美元/天)

77

求最大值．这里

$$
\begin{aligned}
z = {} & x(10+31x^{-0.5}+1.3y^{-0.2})-18x \\
& +y(5+15y^{-0.4}+0.8x^{-0.08})-10y.
\end{aligned}
\tag{17}
$$

图3-11给出了f的图像．图像显示f有一个惟一的达极大值的内点，此点满足$\nabla f=0$．图3-12画出了f的水平集图．由图可见，最大值出现在$x=5$，$y=6$附近．我们计算梯度$\nabla f(x, y)=(\partial z/\partial x, \partial z/\partial y)$，得到

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial z}{\partial x} &= 15.5x^{-0.5}-8+1.3y^{0.2}-0.064yx^{1.08} \\
\frac{\partial z}{\partial y} &= 9y^{-0.4}-5+0.8x^{-0.08}-0.26xy^{-1.2}.
\end{aligned}
\tag{18}
$$

在区域$0\leqslant x\leqslant 10$，$0\leqslant y\leqslant 10$上应用$N=1\ 000$个点的随机搜索算法，得到生产量为每天生产$x=4.8$，$y=5.9$把椅子时可达每天52.06美元的最大利润．为得到最优值点的一个更精确的数值近似解，我们用多变量函数的牛顿法来求解梯度方程$\nabla f=0$．图3-13给出了两个变量的牛顿法算法．

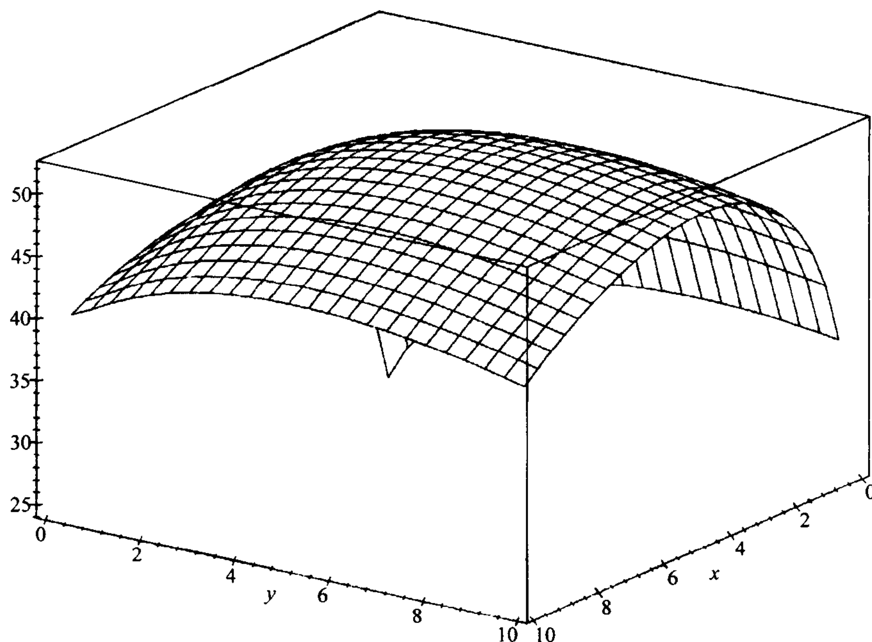


图 3-11　草坪椅问题中利润 $z=f(x, y)$关于每天的木架椅产量 x，铝管椅产量 y 的三维图像

$$f(x, y)=x(10+31x^{-0.5}+1.3y^{-0.2})-18x+y(5+15y^{-0.4}+0.8x^{-0.08})-10y$$

78

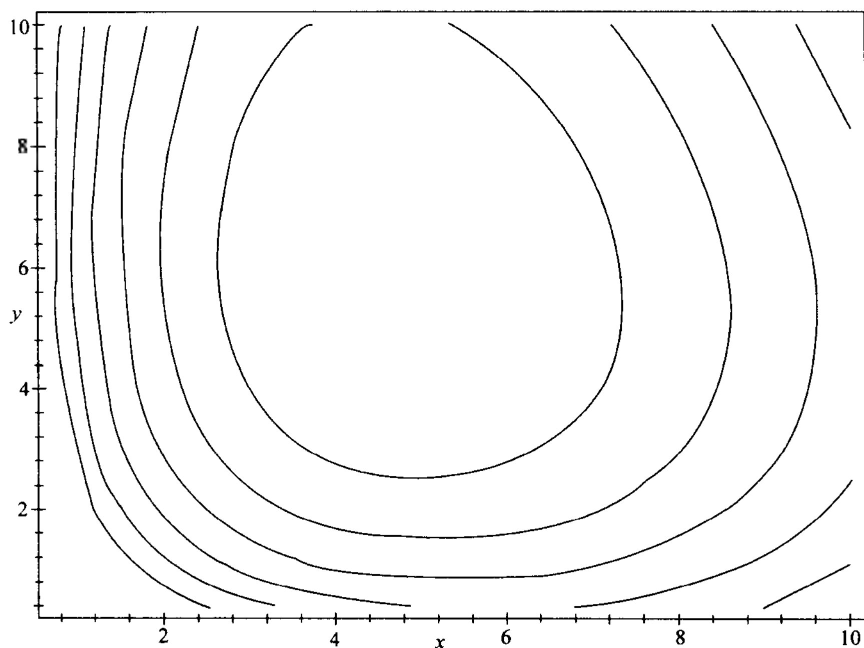


图 3-12　草坪椅问题中利润 $z=f(x, y)$关于每天的木架椅产量 x，铝管椅产量 y 的等值线图

$$f(x, y)=x(10+31x^{-0.5}+1.3y^{-0.2})-18x+y(5+15y^{-0.4}+0.8x^{-0.08})-10y$$

```
算法：两个变量的牛顿法
变量：x(n)=n 次迭代后 x 坐标的近似解
      y(n)=n 次迭代后 y 坐标的近似解
      N=迭代次数
输入：x(0)，y(0)，N
过程：开始
      对n=1 到 N 循环
        开始
        q←∂F/∂x(x(n−1)，y(n−1))
        r←∂F/∂y(x(n−1)，y(n−1))
        s←∂G/∂x(x(n−1)，y(n−1))
        t←∂G/∂y(x(n−1)，y(n−1))
        u←−F(x(n−1)，y(n−1))
        v←−G(x(n−1)，y(n−1))
        D←qt−rs
        x(n)←x(n−1)+(ut−vr)/D
        y(n)←y(n−1)+(qv−su)/D
        结束
      结束
输出：x(N)，y(N)
```

图 3-13　两个变量的牛顿法的伪代码

给定一组可微函数 f_1，…，f_n，$(x_1(0)$，…，$x_n(0))$为如下方程组的根的初始近似值

79

$$\begin{aligned} f_1(x_1,\cdots,x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1,\cdots,x_n) &= 0. \end{aligned} \tag{19}$$

为简化叙述及说明单变量与多变量牛顿法的联系，我们采用向量记号．记 $x=(x_1$，…，$x_n)$，及$F(x)=(f_1(x)$，…，$f_n(x))$，我们可以将(19)式写为 $F(x)=0$ 的形式，$x(0)$为其根的初始估计．牛顿法采用线性近似对$F(x)=0$ 的准确根构造一个精度不断提高的近似值序列 $x(1)$，$x(2)$，$x(3)$，…．在$x=x(0)$附近，我们有 $F(x)\approx F(x(0))+A(x-x(0))$，其中 A 为 $x=x(0)$处的偏导数矩阵

80

$$A=\begin{pmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \dfrac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

这就是切线近似的多变量形式．为得到对 $F(x)=0$ 的准确根的一个更好的估计值 $x=x(1)$，我们令 $F(x(0))+A(x-x(0))=0$，解出 $x=x(1)$，即 $x(1)=x(0)-A^{-1}F(x(0))$．这与在单变量情形下得到的公式的形式是完全相同的，只是这里不能除以导数矩阵，而是要用逆矩阵．当求出的近似解与根充分接近时，每次迭代给

出的近似值的准确数位都会是上一次得到的准确数位的两倍．与单变量情况一样，牛顿法得到的近似序列很快地收敛到准确根．图 3-13 给出的两个变量的牛顿法算法伪代码中用到了 2×2 矩阵的逆矩阵的计算公式

$$\begin{pmatrix} q & r \\ s & t \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{qt - rs}\begin{pmatrix} t & -r \\ -s & q \end{pmatrix}.$$

在一般情况下，需要用其他方法计算导数矩阵 A 的逆．有关多变量牛顿法的更多细节请查阅参考文献：[Press 等，1987]，269 页．

在我们的问题中，有

$$\begin{aligned} F(x,y) &= 15.5x^{-0.5} - 8 + 1.3y^{-0.2} - 0.064yx^{-1.08} \\ G(x,y) &= 9y^{-0.4} - 5 + 0.8x^{-0.08} - 0.26xy^{-1.2}, \end{aligned} \tag{20}$$

从而可以计算出

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= 0.069\,12yx^{-2.08} - 7.75x^{-1.5} \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= -0.064x^{-1.08} - 0.26y^{-1.2} \\ \frac{\partial G}{\partial x} &= -0.064x^{-1.08} - 0.26y^{-1.2} \\ \frac{\partial G}{\partial y} &= 0.312xy^{-2.2} - 3.6y^{-1.4}. \end{aligned} \tag{21}$$

取 $x(0)=5$，$y(0)=5$，用两个变量的牛顿法的计算机程序进行 $N=10$ 次迭代求解，得到

$$\begin{aligned} x &= 4.689\,59 \\ y &= 5.851\,99 \end{aligned} \tag{22}$$

81

作为所求根的近似值．为保证解的可靠性，再取 $N=15$ 计算一次．将结果代入到(17)式中，得到 $z=52.072\,7$．因此，草坪椅问题的最优解为：每天生产 4.69 把木架椅、5.85 把铝管椅，可得到每天 52.07 美元的利润．

与单变量情况相同，求方程组的数值近似解也是一个两步过程．首先要用一个全局方法估计出根的位置．如果只有两个变量，可以采用图像法，但对大多数问题则需要采用某个数值方法如随机搜索法．也可以采用一些较复杂的全局算法，它们通常都适用于某类特殊的问题．下一步我们要用一个快速的局部方法来求高精确度的解，所求出的解的可靠性要通过对能够控制精度的参数进行灵敏性分析，或将数值解带回到原始的方程组中来验证．牛顿法是一个需要计算偏导数的非常快的局部方法．还有许多对偏导数做近似的改进牛顿法，可以参见参考文献：如[Press 等，1987]．大多数电子数据表格软件和计算机代数系统都有多变量方程的求解工具，在大多数数值分析软件的库函数和工具包中也有相应的求解工具．它们的使用都要从用一个全局方法对根的位置做出初始估计开始，然后用求解工具求出解，并照常对解加以验证．不要仅仅输入方程组，用工具求解后就

接受它给出的解，这样可能会导致严重的误差．许多电子数据表格软件、计算机代数系统及数值分析软件包都具有多变量数值最优化工具，通常其程序都采用基于对导数进行数值逼近的变形的牛顿法．对这些程序我们也有同样的建议：首先采用一个全局方法估计最优解的近似值，然后用数值最优化工具求解，最后对参数的容许值进行灵敏性分析，以保证结果的正确．

有约束的多变量最优化问题的求解更加困难．在某些情况下，最优解出现在可行域的内部，从而我们可将问题视为无约束的情况．当最优解出现在边界上时，情况会更为复杂．对这类问题没有简单的、一般有效的计算方法．现有的方法只适用于一些具有特定性质的特殊类型的问题．我们会在下一节中讨论其中最重要的问题．

82

3.3　线性规划

有约束的多变量最优化问题通常总是难于求解的．人们研究了许多计算方法来处理一些特殊类型的多变量最优化问题，但仍缺乏较好的一般性的方法，即使是非常复杂的一般性方法也不存在．讨论这类问题的新的计算方法的研究领域称为*非线性规划*，这是个非常活跃的领域．

最简单的一类有约束多变量最优化问题的目标函数和约束函数都是线性的，对这类问题的计算方法的研究称为*线性规划*．线性规划的软件包非常普及，并且经常地被应用于制造业、投资、农业、运输和政府机构．典型的大规模问题包括数千个决策变量和数千个约束．在许多有资料可查的事例中，基于线性规划模型的运筹分析节约了数百万美元的资金．详细的资料可以在运筹学和管理学的文献中找到．

例 3.4　一个家庭农场有 625 英亩[○] 的土地可以用来种植农作物．这个家庭考虑种植的农作物有玉米、小麦和燕麦．预计可以有 1 000 英亩-英尺的灌溉用水，农场工人每周可以投入的工作时间为 300 小时．其他的数据在表 3-2 中给出．为能够获得最大收益，每种作物应该各种植多少？

表 3-2　例 3.4 中农场问题的有关数据

条件（每英亩）	作物		
	玉米	小麦	燕麦
灌溉用水(英亩-英尺)	3.0	1.0	1.5
劳力(人-小时/周)	0.8	0.2	0.3
收益(美元)	400	200	250

83

我们采用五步方法．第一步的结果显示在图 3-14 中．第二步为选择建模方法．我们用线性规划模型来处理这一问题．

○　1 英亩＝4 046.856m²

变量：

x_1＝种植玉米的英亩数
x_2＝种植小麦的英亩数
x_3＝种植燕麦的英亩数
w＝需要的灌溉用水（英亩－英尺）
l＝需要的劳力（人－小时/周）
t＝种植作物的总英亩数
y＝总收益（美元）

假设：

$w=3.0x_1+1.0x_2+1.5x_3$
$l=0.8x_1+0.2x_2+0.3x_3$
$t=x_1+x_2+x_3$
$y=400x_1+200x_2+250x_3$
$w\leqslant 1\,000$
$l\leqslant 300$
$t\leqslant 625$
$x_1\geqslant 0$；$x_2\geqslant 0$；$x_3\geqslant 0$

目标： 求 y 的最大值

图 3-14 农场问题的第一步的结果

线性规划模型的标准形式（不等式形式）如下：
在由约束

$$\begin{aligned} a_{11}x_1+\cdots+a_{1n}x_n &\leqslant b_1 \\ \vdots \qquad\quad \vdots \quad &\quad \vdots \\ a_{m1}x_1+\cdots+a_{mn}x_n &\leqslant b_m \end{aligned} \tag{23}$$

及 $x_1\geqslant 0$，…，$x_n\geqslant 0$ 定义的可行域上对目标函数 $y=f(x_1,\cdots,x_n)=c_1x_1+\cdots+c_nx_n$ 求最大值．这是第 2 章中讨论的有约束多变量最优化问题的一种特殊情况．记

$$\begin{aligned} g_1(x_1,\cdots,x_n) &= a_{11}x_1+\cdots+a_{1n}x_n \\ &\vdots \\ g_m(x_1,\cdots,x_n) &= a_{m1}x_1+\cdots+a_{mn}x_n \end{aligned} \tag{24}$$

84

及

$$\begin{aligned} g_{m+1}(x_1,\cdots,x_n) &= x_1 \\ &\vdots \\ g_{m+n}(x_1,\cdots,x_n) &= x_n. \end{aligned}$$

约束可以写为 $g_1\leqslant b_1$，…，$g_m\leqslant b_m$，及 $g_{m+1}\geqslant 0$，…，$g_{m+n}\geqslant 0$．满足这些约束的 $(x_1,\cdots,x_n)$ 的集合称为可行域，表示决策变量 x_1，…，x_n 的所有可行的取值．由于 $\nabla f=(c_1,\cdots,c_n)$ 不可能是零，函数不可能在其可行域的内部达最大值．在边界上的最大值点上，我们有

$$\nabla f=\lambda_1\nabla g_1+\cdots+\lambda_{m+n}\nabla g_{m+n} \tag{25}$$

这里只有第 i 个约束是关键约束时才有 $\lambda_i \neq 0$. 对 $i=1, \cdots, m$, 拉格朗日乘子 λ_i 代表了若将第 i 个约束的限制条件放松一个单位时(即将第 i 个约束改为 $g_i(x_1, \cdots, x_n) \leqslant b_i + 1$), 目标函数 $y - f(x_1, \cdots, x_n)$ 最大值的可能的增加量. 线性规划问题的最优解的计算通常采用一个*单纯形法*的变形, 用计算机来完成. 这一方法的基础是最优解一定会出现在可行域的某个顶点处(你很容易验证这一点). 我们不讨论单纯形法的代数细节, 而是将重点放在介绍正确使用线性规划软件包所需要了解的内容上.

在单纯形法中, 顶点坐标的计算采用线性规划模型的另一种标准形式(等式形式): 在由约束

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n + x_{n+1} \qquad\qquad &= b_1 \\ a_{21}x_1 + \cdots + a_{2n}x_n \qquad + x_{n+2} &= b_2 \\ \vdots \qquad\qquad \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \qquad\qquad + x_{n+m} &= b_m \end{aligned} \tag{26}$$

85

及 $x_1 \geqslant 0, \cdots, x_{n+m} \geqslant 0$ 定义的集合上对 $y=c_1x_1+\cdots+c_nx_n$ 求最大值. 变量 x_{n+i} 称为*松弛变量*, 因为它代表了第 i 个约束的松弛剩余量. 当松弛变量 $x_{n+i}=0$ 时第 i 个约束为关键约束. 一个顶点的坐标可以通过令变量 $x_1, \cdots, x_{m+n}$ 中的 n 个变量为零值后, 求解相应的 m 个未知数、m 个方程的联立方程组得到. 如果剩下的 m 个变量(称为*基变量*)的值都是非负, 则这个顶点为可行的.

假设我们有一个中等规模的线性规划问题, 包含 $n=50$ 个变量和 $m=100$ 个约束. 则顶点的数目等于从 150 个变量(50 个决策变量加上 100 个松弛变量)中选择 50 个取为零的变量的全部可能情况的数量. 从 150 中选 50 的数量为(150!)/(50!)(100!), 约为 2×10^{40}. 一个每十亿分之一秒可以检查一个顶点的计算机程序要运行约 8×10^{30} 年才能解出这个问题. 这是一个典型的线性规划应用的例子. 单纯形法只计算从顶点中一个选出的子集(总数的非常小的一部分). 一个规模为 $n=50$, $m=100$ 的线性规划问题可以在一台大型机上很快地解出. 在我们写这本书的时候, 这样规模的问题已经达到了在个人计算机上用合理的时间求解的上限, 但在不久的将来, 随着技术的进步, 这一限制一定会放宽. 一般地, 用单纯形法求解线性规划问题的执行时间正比于 m^3, 因此处理器速度提高一个数量级会使能用这台机器处理的线性规划问题的规模提高到两倍以上. 对本书中的问题, 任何好的单纯形法计算机执行程序都是适用的, 建议不要用手算求解这些问题.

第三步是将线性规划模型表示为标准形式. 在我们的问题中, 决策变量为每种作物种植的英亩数 x_1, x_2, x_3. 我们要在集合

$$\begin{aligned} 3.0x_1 + 1.0x_2 + 1.5x_3 &\leqslant 1\,000 \\ 0.8x_1 + 0.2x_2 + 0.3x_3 &\leqslant 300 \\ x_1 \quad + x_2 \quad + x_3 &\leqslant 625 \end{aligned} \tag{27}$$

及 $x_1 \geqslant 0$，$x_2 \geqslant 0$，$x_3 \geqslant 0$ 上对总收益 $y=400x_1+200x_2+250x_3$ 求最大值．

第四步为求解问题．我们用由 Linus Schrage 所写的单纯形法计算机执行程序 LINDO 来求解．第四步的结果表示在图 3-15 中．最优解为 $Z=162\ 500$，$x_1=187.5$，$x_2=437.5$，$x_3=0$．由于第二行与第四行的松弛变量为零，第一个和第三个约束为关键约束．而第三行的松弛变量等于 62.5，因此第二个约束条件不是关键的． 86

```
MAX      400 X1 + 200 X2 + 250 X3
SUBJECT TO
        2)   3 X1 + X2 + 1.5 X3 <=   1000
        3)   0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 <=   300
        4)   X1 + X2 + X3 <=   625
END

LP OPTIMUM FOUND AT STEP      2

        OBJECTIVE FUNCTION VALUE

        1)     162500.000

VARIABLE        VALUE          REDUCED COST
      X1       187.500000          .000000
      X2       437.500000          .000000
      X3          .000000        -.000015

     ROW     SLACK OR SURPLUS     DUAL PRICES
      2)          .000000       100.000000
      3)        62.500000          .000000
      4)          .000000        99.999980

NO. ITERATIONS=        2
```

图 3-15 用线性规划软件包 LINDO 求出的农场问题的最优解

第五步为回答问题．问题为每种作物应该各种植多少．最优的方案为种玉米 187.5 英亩，种小麦 437.5 英亩，不种燕麦．这样可以得到 162 500 美元的收益．我们求出的最优的作物种植方案用光了 625 英亩的土地和 1 000 英亩-英尺的灌溉用水，但在可用的每周 300 人-小时的劳力中只用掉了 237.5．这样每周有 62.5 人-小时可以用于其他可获利的工作或空闲下来．

我们的灵敏性分析首先从考虑可用的灌溉用水量开始．这个量会由于降水和温度而改变，这会影响农场的蓄水池的水量．还可能从附近的农场购买额外的灌溉用水．图 3-16 显示了增加 1 英亩-英尺的灌溉水量对最优解的影响．现在我们可以多种半英亩的玉米(可获利更多的作物)，而且还节约了一点劳力(每周 0.3 人-小时)．净收益增加了 100 美元． 87

```
MAX     400 X1 + 200 X2 + 250 X3
SUBJECT TO
       2)   3 X1 + X2 + 1.5 X3 <=   1001
       3)   0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 <=   300
       4)   X1 + X2 + X3 <=   625
END

LP OPTIMUM FOUND AT STEP      0

       OBJECTIVE FUNCTION VALUE

       1)    162600.000

VARIABLE         VALUE          REDUCED COST
      X1      188.000000            .000000
      X2      437.000000            .000000
      X3         .000000          -.000015

     ROW   SLACK OR SURPLUS      DUAL PRICES
      2)         .000000        100.000000
      3)       62.200000            .000000
      4)         .000000         99.999980
NO. ITERATIONS=        0
```

图 3-16 用线性规划软件包 LINDO 求出的在农场问题中增加1英亩-英尺的水量的最优解

这 100 美元是该资源的影子价格(灌溉用水). 农场会愿意以不超过 100 美元每英亩-英尺的价格购买额外的灌溉用水. 另一方面，农场不会愿意以低于 100 美元每英亩-英尺的价格出让自己拥有的灌溉用水. 在图 3-15 中，三种资源(水、劳力和土地)的影子价格称为对偶价格. 它们列在相应的松弛变量旁边. 增加 1 [88] 英亩的土地的价值为 100 美元，额外增加劳力的价值为零，因为劳力已经是过剩的了.

种植每种作物能够获得的每英亩的收益会随着气候和市场变化. 图 3-17 显示了玉米收益的少量提高对最优解的影响. 这不会影响决策变量 x_1，x_2 和 x_3(每种作物的种植数量)的最优取值. 总的收益当然会增加，增加量为 $50x_1=9\ 375$ 美元. 影子价格的改变也是值得注意的. 由于玉米的收益提高，水的价值更高 [89] 了. (虽然水和土地约束都是关键的，但水的约束限制了我们种植更多的玉米来取代小麦.)

图 3-18 显示了如果燕麦的收益比预期的提高一些会出现什么情况. 这个参数的一个很小的变化对最优解有很显著的影响. 现在我们以种燕麦取代了种小麦. 玉米的种植量也有相当的减少. 显然我们的模型对这个参数很敏感. 由于这一情况，需要对这个参数的灵敏性进行更深入的讨论.

```
MAX      450 X1 + 200 X2 + 250 X3
SUBJECT TO
        2)    3 X1 + X2 + 1.5 X3 <=    1000
        3)    0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 <=    300
        4)    X1 + X2 + X3 <-    625
END
LP OPTIMUM FOUND AT STEP       0

       OBJECTIVE FUNCTION VALUE

       1)     171875.000

VARIABLE         VALUE          REDUCED COST
      X1        187.500000          .000000
      X2        437.500000          .000000
      X3           .000000        12.500000

     ROW     SLACK OR SURPLUS     DUAL PRICES
      2)           .000000       125.000000
      3)         62.500000          .000000
      4)           .000000        75.000000

NO. ITERATIONS=        0
```

图 3-17 用线性规划软件包 LINDO 求出的在农场问题中提高玉米的收益后的最优解

```
MAX      400 X1 + 200 X2 + 260 X3
SUBJECT TO
        2)    3 X1 + X2 + 1.5 X3 <=    1000
        3)    0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 <=    300
        4)    X1 + X2 + X3 <=    625
END
LP OPTIMUM FOUND AT STEP       1

       OBJECTIVE FUNCTION VALUE

       1)     168333.300

VARIABLE         VALUE          REDUCED COST
      X1         41.666670          .000000
      X2           .000000        13.333340
      X3        583.333300          .000000

     ROW     SLACK OR SURPLUS     DUAL PRICES
      2)           .000000        93.333340
      3)         91.666660          .000000
      4)           .000000       120.000000

NO. ITERATIONS=        1
```

图3-18 用线性规划软件包 LINDO 求出的在农场问题中提高燕麦的收益后的最优解

记 c 为燕麦的收益(美元/英亩)，从而目标函数为 $f(x)=400x_1+200x_2+cx_3$. 注意 c 的值不影响可行域 S 的形状. 取不同的 c 再进行几次计算. 当 $c\leqslant 250$ 时最优解出现在顶点(187.5，437.5，0)处，而当 $c>250$ 时最优解出现在相邻的顶点($41.6\overline{6}$，0，$583.3\overline{3}$)处，这两个点都在由两个平面

[90]

$$\begin{aligned} 3.0x_1+1.0x_2+1.5x_3&=1\,000 \\ x_1\quad+x_2\quad+x_3&=625. \end{aligned} \tag{28}$$

相交得到的直线上. 考虑这条直线上任一点处的梯度向量 $\nabla f=(400, 200, c)$，当 $c<250$ 时，梯度向量指向 $x_3=0$ 的顶点，当 $c>250$ 时，梯度向量指向 $x_2=0$ 的顶点. 随着 c 的增加，梯度向量从前一个点转向后一个点. 当 $c=250$ 时，梯度向量 ∇f 与通过这两点的直线垂直. 对这个 c 值，位于这两个顶点之间的线段上的任何一个点都是最优解.

模型对参数 c 的灵敏性的实际结果就是我们不知道应该种燕麦还是应该种小麦. 收益的一个微小变化就会改变我们的最优决策. 根据每英亩的收益会随着天气和市场变化的事实，最好是能给农场主不止一个的选择. 任何一种作物的混合种植方式($0\leqslant t\leqslant 1$)

$$\begin{aligned} x_1&=187.5t+41.6\overline{6}(1-t) \\ x_2&=437.5t+0(1-t) \\ x_3&=0t+583.3\overline{3}(1-t), \end{aligned} \tag{29}$$

都会用尽现有的土地和灌溉用水资源. 每英亩的收益数据有太多的不确定因素，因此无法说明哪个选择会产生最大利润.

有时灵敏性分析要根据将初始的研究结果应用于实际后得到的客户反馈来进行. 假设在农场主看到我们的分析结果之后，又接到了有一个新的玉米品种广告的新种子目录. 这种新品种玉米较贵，但据称所需灌溉用水量少. 图 3-19 为假设种玉米只需要 2.5 英亩-英尺(而不是 3.0)的灌溉用水时的灵敏性计算结果. 新品种玉米可多获得 12 500 美元的收益，而在这种情况下，我们当然会比以前种更多的玉米. 值得注意的是这时水的影子价格也提高了 33%.

[91]

最后假设农场主想考虑增加另一种新的作物——大麦. 一英亩大麦需要 1.5 英亩-英尺的水和 0.25 人-小时的劳力，预期可获得 200 美元的收益. 在我们的模型中用一个新的决策变量 x_4=大麦的英亩数来表示这种新的作物. 图 3-20 为模型的计算结果. 与我们的原问题相比结果基本不变. 玉米和小麦的混合种植方案仍是最优解，其原因也很容易看出. 虽然大麦和小麦的收益是相同的，但大麦需要更多的水和劳力.

```
MAX      400 X1 + 200 X2 + 250 X3
SUBJECT TO
        2)    2.5 X1 + X2 + 1.5 X3 <=    1000
        3)    0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 <=    300
        4)    X1 + X2 + X3 <=    625
END
LP OPTIMUM FOUND AT STEP       1

        OBJECTIVE FUNCTION VALUE

        1)     175000.000

VARIABLE           VALUE            REDUCED COST
      X1          250.000000             .000000
      X2          375.000000             .000000
      X3             .000000           16.666680
     ROW      SLACK OR SURPLUS       DUAL PRICES
      2)             .000000          133.333300
      3)           25.000000             .000000
      4)             .000000           66.666660
NO. ITERATIONS=         1
```

图 3-19　用线性规划软件包 LINDO 求出的在农场问题中种植低用水量的玉米时的最优解

```
MAX      400 X1 + 200 X2 + 250 X3 + 200 X4
SUBJECT TO
        2)    3 X1 + X2 + 1.5 X3 + 1.5 X4 <=    1000
        3)    0.8 X1 + 0.2 X2 + 0.3 X3 + 0.25 X4 <= 300
        4)    X1 + X2 + X3 + X4 <=    625
END

LP OPTIMUM FOUND AT STEP       1

        OBJECTIVE FUNCTION VALUE

        1)     162500.000

VARIABLE           VALUE            REDUCED COST
      X1          187.500000             .000000
      X2          437.500000             .000000
      X3             .000000            -.000015
      X4             .000000           49.999980

     ROW      SLACK OR SURPLUS       DUAL PRICES
      2)             .000000          100.000000
      3)           62.500000             .000000
      4)             .000000           99.999980

NO. ITERATIONS=         1
```

图 3-20　用线性规划软件包 LINDO 求出的在农场问题中增加新作物大麦时的最优解

例 3.5　一家大建筑公司正在三个地点开掘. 同时又在其他四个地点建筑，这里需要土方的填充. 在 1、2、3 处挖掘产生的土方分别为每天 150，400，325 立方码[○]. 建筑地点 A、B、C、D 处需要的填充土方分别为每天 175，125，225，450 立方码. 也可以从地点 4 用每立方码 5 美元的价格获得额外的填充土方. 填充土方运输的费用约为一货车容量每英里 20 美元. 一辆货车可以搬运 10 立方码的土方. 表 3 3 给出了各地点间距离的英里数. 求使公司花费最少的运输计划.

92

表 3-3　例 3.5 中土方问题的英里数：建筑地点间的距离

挖掘地点	接收填充土方的地点			
	A	B	C	D
1	5	2	6	10
2	4	5	7	5
3	7	6	4	4
4	9	10	6	2

我们采用五步方法. 第一步的结果显示在图 3-21 中. 例如我们可以每天从地点 1 运出不超过 150 立方码的土方，而我们至少要向地点 A 运去 175 立方码的土方. 由于每英里运 10 立方码的土方要花费 20 美元，从地点 $i=1$，2，3 向地点 $j=A$，B，C，D 运 1 立方码的土方需要每英里 2 美元. 如果从地点 4 运出，还要增加每立方码 5 美元的费用. 假设只要我们愿意付费，可以从地点 4 获得的土方量就是不受限制的.

93

第二步是选择建模方法. 我们用线性规划模型来处理这一问题，并用电子数据表格软件来求解. 大多数电子数据表格软件都包含一个解方程工具或一个采用单纯形法的最优化工具. 如果一个线性规划问题不是(23)或(26)式中定义的标准形式，可以很容易地将其转化为标准形. 例如，若对目标函数 $y=f(x_1, \cdots, x_n)$ 求最小值，可以化为对 $-y$ 求最大值. 很多软件都可以自动进行这些转化，从而允许问题以更自然的形式表示. 对运输问题，单纯形法有一个特别的改进方法，这种运输单纯形法对大规模的问题的求解效率很高. 对我们现在的问题，一般的单纯形法就足够了.

第三步是将问题表示为线性规划模型的形式. 在这个问题中，决策变量为从地点 i 运往地点 j 的以立方码为单位的土方数 x_{ij}. 目标为求总运费 $y=C$ 的最小值，这里

$$
\begin{aligned}
y = & 10x_{1A} + 4x_{1B} + 12x_{1C} + 20x_{1D} \\
& + 8x_{2A} + 10x_{2B} + 14x_{2C} + 10x_{2D} \\
& + 14x_{3A} + 12x_{3B} + 8x_{3C} + 8x_{3D} \\
& + 23x_{4A} + 25x_{4B} + 17x_{4C} + 9x_{4D}
\end{aligned}
\tag{30}
$$

○　1 立方码 $=0.765\mathrm{m}^3$

变量：

x_{ij}＝从地点 i 运到地点 j 的土方量(立方码)

s_i＝从地点 i 运出的土方量(立方码)

r_j＝运到地点 j 的土方量(立方码)

c_{ij}＝从地点 i 运到地点 j 的土方运输费用(美元/立方码)

d_{ij}＝地点 i 到地点 j 的距离(英里)

C＝总运费(美元)

假设：

$s_1 = x_{1A}+x_{1B}+x_{1C}+x_{1D}$

$s_2 = x_{2A}+x_{2B}+x_{2C}+x_{2D}$

$s_3 = x_{3A}+x_{3B}+x_{3C}+x_{3D}$

$s_4 = x_{4A}+x_{4B}+x_{4C}+x_{4D}$

$r_A = x_{1A}+x_{2A}+x_{3A}+x_{4A}$

$r_B = x_{1B}+x_{2B}+x_{3B}+x_{4B}$

$r_C = x_{1C}+x_{2C}+x_{3C}+x_{4C}$

$r_D = x_{1D}+x_{2D}+x_{3D}+x_{4D}$

$s_1 \leqslant 150$，$s_2 \leqslant 400$，$s_3 \leqslant 325$

$r_A \geqslant 175$，$r_B \geqslant 125$，$r_C \geqslant 225$，$r_D \geqslant 450$

$c_{ij}=2d_{ij}$，若 $i=1, 2, 3$. 或

$c_{ij}=2d_{ij}+5$，若 $i=4$.

其中 d_{ij} 在表 3-3 中给出

其中：

$$C = c_{1A}x_{1A}+c_{1B}x_{1B}+c_{1C}x_{1C}+c_{1D}x_{1D}$$
$$+c_{2A}x_{2A}+c_{2B}x_{2B}+c_{2C}x_{2C}+c_{2D}x_{2D}$$
$$+c_{3A}x_{3A}+c_{3B}x_{3B}+c_{3C}x_{3C}+c_{3D}x_{3D}$$
$$+c_{4A}x_{4A}+c_{4B}x_{4B}+c_{4C}x_{4C}+c_{4D}x_{4D}$$

$x_{ij} \geqslant 0$，$i=1, 2, 3, 4$，$j=A, B, C, D$

目标： 求 C 的最小值

图 3-21　土方问题的第一步的结果

94

满足约束

$$\begin{aligned}
x_{1A}+x_{1B}+x_{1C}+x_{1D} &\leqslant 150\\
x_{2A}+x_{2B}+x_{2C}+x_{2D} &\leqslant 400\\
x_{3A}+x_{3B}+x_{3C}+x_{3D} &\leqslant 325\\
x_{1A}+x_{2A}+x_{3A}+x_{4A} &\geqslant 175\\
x_{1B}+x_{2B}+x_{3B}+x_{4B} &\geqslant 125\\
x_{1C}+x_{2C}+x_{3C}+x_{4C} &\geqslant 225\\
x_{1D}+x_{2D}+x_{3D}+x_{4D} &\geqslant 450
\end{aligned} \tag{31}$$

及 $x_{ij} \geqslant 0$，$i=1, 2, 3, 4$；$j=A, B, C, D$. 图 3-22 为此问题的一个电子表格结构. 大多数单元格内都有数据. 我们在单元格 $F9$ 到 $F12$，$B13$ 到 $E13$ 及 $B15$ 中

95

定义公式. 比如，我们输入 $F9=B9+C9+D9+E9$，及 $B13=B9+B10+B11+B12$，$B15=B3*B9+C3*C9+\cdots+D6*D12+E6*E12$. 然后我们要告诉电子表格哪个单元格是目标、哪些单元格包含决策变量，并给出约束. 具体的细节随不同的电子表格而变化. 如果你对怎样使用不熟悉，可以参考你所用电子表格的软件手册或使用在线帮助工具.

A	A	B	C	D	E	F	G
1	花费						
2	地点	*A*	*B*	*C*	*D*		
3	1	10	4	12	20		
4	2	8	10	14	10		
5	3	14	12	8	8		
6	4	23	25	17	9		
7	解						
8	地点	*A*	*B*	*C*	*D*	运出量	可用量
9	1	0	0	0	0	0	150
10	2	0	0	0	0	0	400
11	3	0	0	0	0	0	325
12	4	0	0	0	0	0	
13	收到量	0	0	0	0		
14	需求量	175	125	225	450		
15	总运费	0					

图 3-22　用电子数据表格表示的土方问题

第四步是求解问题. 图 3-23 显示了用电子表格的 Quattro Pro 优化工具得到的本问题的解. 注意所有的接收量约束都是关键的约束，而运出量的约束则不全是关键的. 第五步为回答问题. 最优解为每天从地点 1 向地点 *B* 运输 125 立方码的土方，从地点 2 向地点 *A* 运输 175 立方码，从地点 3 向地点 *C* 运输 225 立方码，再向地点 *D* 运输 100 立方码. *D* 所需要的剩余 350 立方码的土方从地点 4 获得. 购买土方需要的额外费用由于地点 4 与 *D* 的距离近而抵消. 这一运输方案的总费用为每天 7 650 美元. 按这一方案，我们没有用掉地点 1、2 的所有挖掘出的土方，因此我们应该做其他安排来处理多余的土方.

96

我们首先通过检查可以由电子表格的最优化工具自动给出的一些结果报告来进行灵敏性分析. 图 3-24 为关于问题的约束的灵敏性报告. 注意地点 1 和 2 的约束不是关键的，分别有 25 和 225 的松弛量. 这表示在最优方案中，地点 1 挖掘出的土方中有 25 立方码没有被运出，地点 2 有 225 立方码没有被运出. 图 3-24 列出的对偶变量为影子价格. 由于约束不是关键的，地点 1 和 2 的影子价

A	A	B	C	D	E	F	G
1	花费						
2	地点	*A*	*B*	*C*	*D*		
3	1	10	4	12	20		
4	2	8	10	14	10		
5	3	14	12	8	8		
6	4	23	25	17	9		
7	解						
8	地点	*A*	*B*	*C*	*D*	运出量	可用量
9	1	0	125	0	0	125	150
10	2	175	0	0	0	175	400
11	3	0	0	225	100	325	325
12	4	0	0	0	350	350	
13	收到量	175	125	225	450		
14	需求量	175	125	225	450		
15	总运费	7 650					

图 3-23 用电子数据表格求出的土方问题的最优运输方案

格为零. 地点 3 的影子价格为－1 美元，其含义为如果此约束的限制增加 1 立方码的土方，总运费就会增加－1 美元. 用电子表格求解的一个主要优点就是我们可以很容易地进行灵敏性分析. 我们只要简单地在单元格 F12 中将 325 改为 326 再来求最优解即可. 得到的最优解为(没有显示出来)E11 变为 101，E12 变为 349，B15 变为 7 649. 所有其他的决策变量的值都没有改变. 换句话说，我们从地点 3 多运 1 立方码到地点 *D*，从而每天可节省 1 美元. 97

单元	值	约束	是否关键	松弛量	对偶值	增加量	减少量
1	125	＜=150	否	25	0	无限制	25
2	175	＜=400	否	225	0	无限制	225
3	325	＜=325	是	0	－1	350	100
A	175	＞=175	是	0	8	225	175
B	125	＞=125	是	0	4	25	125
C	225	＞=225	是	0	9	100	225
D	450	＞=450	是	0	9	无限制	350

图 3-24 土方问题电子数据表格的灵敏性分析报告，给出了关于土方的可用量和需求量的变化的灵敏性

地点 *A*、*B*、*C*、*D* 的影子价格都是正的. 例如，地点 *C* 的影子价格为 9 美元. 如果我们在地点 *C* 多需求 10 立方码的土方，则总费用会增加 90 美元. 为验

证这一点，我们将 D14 从 225 改为 235，再求最优解. 相应的最优解显示在图 3-25 中. 我们注意到总费用增加了 90 美元，从 7 650 美元增加到 7 740 美元. 现在地点 C 从地点 3 接收了 235 立方码，地点 D 从地点 3 接收了 90 立方码，从地点 4 接收了 360 立方码，其他的运输量保持不变.

A	A	B	C	D	E	F	G
1	花费						
2	地点	*A*	*B*	*C*	*D*		
3	1	10	4	12	20		
4	2	8	10	14	10		
5	3	14	12	8	8		
6	4	23	25	17	9		
7	解						
8	地点	*A*	*B*	*C*	*D*	运出量	可用量
9	1	0	125	0	0	125	150
10	2	175	0	0	0	175	400
11	3	0	0	235	90	325	325
12	4	0	0	0	360	360	
13	收到量	175	125	235	450		
14	需求量	175	125	235	450		
15	总运费	7 740					

图 3-25 用电子数据表格求出的土方问题中地点 C 的土方需求量增加 10 立方码的解

图 3-24 中标记增加量与减少量的列给出使影子价格保持有效的各个约束条件的增加和减少量. 如果我们提高地点 C 的需求量，从 225 到不超过 325，则总运费会提高每立方码 9 美元. 如果 C 的需求超过了 325，则解的性质会改变. 在这个例子中，我们很容易看出为什么 C 每天需求的土方超过了 325 立方码时，解的性质会改变. 现在我们将地点 3 的所有土方都运到地点 C，但如果 C 的需求超过了 325，我们还要用更高的价格从其他地点运来土方.

图 3-26 显示了电子表格给出的关于目标函数的系数的灵敏性的报告. 其中的增加量和减少量表示使最优解保持不变的每一个每公里运费数据所允许的增加量和减少量. 例如，现在从地点 1 到地点 B 的每公里运费为 4 美元，当减少量不超过 4 美元，增加量不超过 6 美元时最优的运输方案不变. 总的运费会改变，这是因为我们每天从地点 1 到地点 B 运 125 立方码的土方. 考虑单纯形法的几何性质，当我们改变目标函数的系数时，可行域根本没有改变. 只有当目标函数变化较大，使得当前的最优解顶点不再保持最优时，最优解才会改变. 这时最优解转到另一个顶点. 我们可以通过改变单元格 C3 的值后再求最优解来验证这一点.

98

如果我们在 C3 中输入 0 到 10 之间的某一个值，会得到与图 3-23 中完全相同的运输方案. 如果我们在 C3 中输入 11，运输方案会改变，这时地点 B 每天会从地点 2 接收 125 立方码的土方，而不从地点 1 接收土方.

变量单元	初始值	最终解	梯度	增加量	减少量
x1A	0	0	10	无限制	2
x2A	0	175	8	2	8
x3A	0	0	14	无限制	7
x4A	0	0	23	无限制	15
x1B	0	125	4	6	4
x2B	0	0	10	无限制	6
x3B	0	0	12	无限制	9
x4B	0	0	25	无限制	21
x1C	0	0	12	无限制	3
x2C	0	0	14	无限制	5
x3C	0	225	8	3	9
x4C	0	0	17	无限制	8
x1D	0	0	20	无限制	11
x2D	0	0	10	无限制	1
x3D	0	100	8	1	3
x4D	0	350	9	1	1

图 3-26 土方问题电子数据表格的灵敏性分析报告：关于运费的改变的灵敏性

最后我们来讨论模型的稳健性. 图 3-23 中的最优解显示我们不应将所有挖出的土方都运到其他的建筑工地. 这就给公司留下了一个问题，就是在哪里放置这些多余的土方. 公司需要在某处存放这些多余的土方，这就会有额外的花费. 我们没有关于这些花费的信息，但我们可以讨论几种可能性. 假设将所有挖出的土方都运到其他建筑工地用于填充. 我们知道这不是最优解，但这样会多花费多少呢？我们可以在模型中做少量的改动来求解. 在第一步中，我们设 $s_1 \leqslant 150$，$s_2 \leqslant 400$，$s_3 \leqslant 325$，现在改为 $s_1 = 150$，$s_2 = 400$，$s_3 = 325$. (31)式中的前三个不等式约束现在用 [99]

$$
\begin{aligned}
x_{1A} + x_{1B} + x_{1C} + x_{1D} &= 150 \\
x_{2A} + x_{2B} + x_{2C} + x_{2D} &= 400 \\
x_{3A} + x_{3B} + x_{3C} + x_{3D} &= 325
\end{aligned}
\tag{32}
$$

来代替. 模型中的其他部分都不变. 在我们的电子表格中改变了这三个约束后求出的最优解的结果显示在图 3-27 中. 地点 B 和 C 接收的数量与以前相同，但现 [100]

在地点 A 每天从地点 1 接收了 25 立方码的填充土方，地点 D 从地点 2 接收了 250 立方码的填充土方．根据这一运输方案，我们只要从地点 4 购买 100 立方码．新的方案解决了 250 立方码的多余土方问题，每天只多花费 300 美元的费用，大约为每立方码 1 美元多一点．我们不知道这两个方案哪个最好．如果公司需要将挖出的土方从工地上运走，那么他们会赞成第二个方案．如果可以在挖掘工地或其附近使用这些土方，则他们会赞成原来的方案．我们应该将两个方案都提供给公司的管理层，让他们来选择．

A	A	B	C	D	E	F	G
1	花费						
2	地点	*A*	*B*	*C*	*D*		
3	1	10	4	12	20		
4	2	8	10	14	10		
5	3	14	12	8	8		
6	4	23	25	17	9		
7	解						
8	地点	*A*	*B*	*C*	*D*	运出量	可用量
9	1	25	125	0	0	150	150
10	2	150	0	0	250	400	400
11	3	0	0	225	100	325	325
12	4	0	0	0	100	100	
13	收到量	175	125	225	450		
14	需求量	175	125	225	450		
15	总运费	7 950					

101

图 3-27　土方问题中将所有挖出的土方都运走的电子数据表格解

3.4　离散最优化

到现在为止，我们在本书中讨论的模型都是连续变量．在许多实际问题中，我们必须要处理离散变量，比如整数．离散数学曾被认为是比较神秘的领域，没有或几乎没有什么实际的应用．随着数字计算机的发明，离散数学变得极其重要．离散最优化对时间安排、物资存储、投资、运输、制造业、生态学和计算机科学等方面的问题都非常有用．在本书后面的内容中离散模型是非常重要的一部分，连续与离散变量之间的联系也是数学建模的一个主要内容．

在一些情况下，一个离散最优化问题可以简单地用列出所有可能情况的方法求解．对另一些问题，我们可以采用连续模型，然后用舍入的方法求出最接近的整数解．当连续的决策变量变为离散变量时非线性规化问题通常会难解得多．没有连续性后可行域会变得很复杂，通常用一个图或树结构来描述．对一些类型的问题已经开发出了有效的求解算法，对这些算法的改进是一个非常活

跃的研究领域，但与连续的情形一样，迄今还没有求解离散最优化问题的普遍的有效方法.

在这一节中，我们集中讨论一种类型的离散最优化问题：整数规划．整数规划是前一节讨论的线性规划模型的离散情形．它除了是应用最广泛的离散最优化算法之外，与线性规划的相似性使我们易于比较离散和连续模型．另一个好处是大多数线性规划程序软件也可以解整数规划问题，从而我们可以将注意力集中在模型本身上，而不必去学习一个新的软件包.

例 3.6　仍考虑例 3.4 中讨论的家庭农场问题．这个家庭有 625 英亩的土地可以用来种植．有 5 块每块 120 英亩的地和另一块 25 英亩的地．这家人想在每一块地上只种一种作物：玉米、小麦或燕麦．与前面一样，有 1000 英亩-英尺可用的灌溉用水，每周农场工人可提供 300 小时的劳力．其他的数据在表 3-2 中给出．求应该在每块地中种植哪种作物，从而使总收益达最大.

我们采用五步方法．第一步的结果显示在图 3-28 中．第二步为选择建模方法．我们用整数规划模型来处理这一问题. 102

变量：

x_1＝种植玉米的 120 英亩地块数目

x_2＝种植小麦的 120 英亩地块数目

x_3＝种植燕麦的 120 英亩地块数目

x_4＝种植玉米的 25 英亩地块数目

x_5＝种植小麦的 25 英亩地块数目

x_6＝种植燕麦的 25 英亩地块数目

w＝需要的灌溉用水（英亩–英尺）

l＝需要的劳力（人–小时/周）

t＝种植作物的总英亩数

y＝总收益（美元）

假设：

$w=120(3.0x_1+1.0x_2+1.5x_3)+25(3.0x_4+1.0x_5+1.5x_6)$

$l=120(0.8x_1+0.2x_2+0.3x_3)+25(0.8x_4+0.2x_5+0.3x_6)$

$t=120(x_1+x_2+x_3)+25(x_4+x_5+x_6)$

$y=120(400x_1+200x_2+250x_3)+25(400x_4+200x_5+250x_6)$

$w\leqslant 1\,000$

$l\leqslant 300$

$t\leqslant 625$

$x_1+x_2+x_3\leqslant 5$

$x_4+x_5+x_6\leqslant 1$

x_1，…，x_6 为非负整数

目标：求 y 的最大值

图 3-28　修改了的农场问题的第一步的结果

整数规划（IP）问题为在线性规划（LP）问题中进一步对决策变量要求取整数值的情形．目标函数和约束都要求是线性的．求解 IP 问题的最常用的方法是分

支定界法．这一方法是通过分支反复求解用来限定 IP 的解的范围的一系列 LP 问题．如果我们在给定的 IP 问题中去掉对决策变量的整数约束，就得到一个 LP 问题，我们称之为 LP 松弛问题．由于 LP 松弛问题的可行域大于相应的 IP 问题的可行域，LP 松弛问题的决策变量为整数的最优解也就是 IP 问题的最优解．如果有些决策变量不是整数，我们将其分支为两个另外的 LP 松弛问题．比如，如果 LP 松弛问题的最优解得到 $x_1=11/3$，我们就和原问题一起考虑增加新约束 $x_1\leqslant 3$ 的一个 LP 问题，及另一个增加新约束 $x_1\geqslant 4$ 的 LP 问题．任何一个整数解一定满足这两个新约束之一．每次求出小数最优解时就继续分支，我们可以得到一个 LP 松弛问题的二叉树．如果其中的某个新 LP 问题有所有决策变量都是整数的最优解，则这个解可以作为原 IP 的最优解的一个可能选择．由于这个新 LP 问题的可行域比原问题的小，这个整数解也可以给出原 IP 问题的最优解的一个可用的下界．系统地分支讲述全部分叉，并利用解的上下界，我们最终可以解出原 IP 问题．由于分支定界法需要单纯形法的多次迭代，对相同规模的问题，求解整数规划问题的时间通常比求解线性规划问题的时间要长得多．

[103]

第三步为将问题用公式表示．在我们的问题中，决策变量为种植玉米、小麦和燕麦的 120 英亩地块的数目及 25 英亩地块的数目．注意变量 x_4，x_5，x_6 为二值决策变量，取值只能是 0 或 1．我们的整数规划问题的标准形式为：在集合

$$\begin{aligned}
375x_1+125x_2+187.5x_3+75x_4+25x_5+37.5x_6&\leqslant 1\,000\\
100x_1+25x_2+37.5x_3+20x_4+5x_5+7.5x_6&\leqslant 300\\
x_1+x_2+x_3&\leqslant 5\\
x_4+x_5+x_6&\leqslant 1
\end{aligned}\tag{33}$$

上对总收益 $y=48\,000x_1+24\,000x_2+30\,000x_3+10\,000x_4+5\,000x_5+6\,250x_6$ 求最大值．其中 x_1，…，x_6 为非负整数．

第四步为求解问题．图 3-29 为用常用的线性规划软件包 LINDO 求出的这个整数规划问题的解．命令 GIN6 指定了前 6 个决策变量是非负整数．这个问题中其他所有的用法对 IP 与 LP 都是一致的．最优解为 $y=156\,250$，出现在 $x_3=5$，$x_6=1$，其他决策变量都是 0．在达最优解时，前两个约束不是关键的，后两个约束是关键的．

第五步为回答问题．如果这个家庭不想分开独立的地块(计划 B)，那么最好的方案是在每块地上都种燕麦，这样可以在这一季得到 156 250 美元的预期收入．这比如果允许在每块地上种多于一种的作物(计划 A，最优解在例 3.4 中求出．)可得到的 162 500 美元的收益要少约 4%．计划 A 用掉了所有的可用土地，可用的灌溉水，在每周 300 人-小时的可用劳力中有 62.5 的剩余．计划 B 用掉了所有的可用土地，但在 1 000 英亩-英尺的可用灌溉水中只用了其中的 975，在每周 300 人-小时的可用劳力中只用了其中的 195．我们留给这个家庭去决定哪个计划是最好的．

[104]

```
MAX  48000 X1 + 24000 X2 + 30000 X3 + 10000 X4 + 5000 X5 + 6250 X6
SUBJECT TO
  2).  375 X1 + 125 X2 + 187.5 X3 + 75 X4 + 25 X5 + 37.5 X6 <= 1000
  3)   100 X1 + 25 X2 + 37.5 X3 + 20 X4 + 5 X5 + 7.5 X6 <= 300
  4)   X1 + X2 + X3 <- 5
  5)   X4 + X5 + X6 <= 1
END
GIN      6

        OBJECTIVE FUNCTION VALUE

        1)       156250.0

  VARIABLE          VALUE          REDUCED COST
        X1          0.000000      -48000.000000
        X2          0.000000      -24000.000000
        X3          5.000000      -30000.000000
        X4          0.000000      -10000.000000
        X5          0.000000       -5000.000000
        X6          1.000000       -6250.000000

       ROW    SLACK OR SURPLUS      DUAL PRICES
        2)        25.000000          0.000000
        3)       105.000000          0.000000
        4)         0.000000          0.000000
        5)         0.000000          0.000000

 NO. ITERATIONS=      101
```

图 3-29　用线性规划软件包 LINDO 求出的修改了的农场问题的最优解

整数规划的灵敏性分析是非常耗时的，这是因为求解 IP 要比求解 LP 的时间长很多. 这时也没有给我们以指导的影子价格，这是因为达最优解时的目标函数随着约束条件的改变不是光滑的. 整数解也不一定恰好出现在约束的边界上，因此最优解也可能对非关键约束的小变化敏感. 我们首先讨论可用的灌溉水量. 假设有额外的 100 英亩-英尺的水可用. 从而(33)式中的 IP 问题中第一个约束的 1000 由 1100 所取代. 图 3-30 为用 LINDO 求出的这个 IP 问题的解. 现在我们要在一块 120 英亩的地块上种玉米，在一块 120 英亩的地块上种小麦，在其他地块上种燕麦. 最优解对总的可用水量相当敏感，虽然这一约束在原始的 IP 问题的解中并不是关键约束. 新的方案可以多获得 12 000 美元的预期收入. 105

图 3-29 中的最优解显示了有 25 英亩-英尺的没有用掉的灌溉用水. 如果我们减少可用水量，只要总水量不低于 975 英亩-英尺，最优解就不会改变. 这是因为这个解仍是可行的. 而现在可行域缩小了，因此它一定还是最优解. 图 3-31 显示了只有 950 英亩-英尺的可用水时的情况. 这时 IP 问题的最优解为

```
MAX   48000 X1 + 24000 X2 + 30000X3 + 10000X4 + 5000 X5 + 6250 X6
SUBJECT TO
  2)    375 X1 + 125 X2 + 187.5 X3  + 75 X4 + 25 X5 + 37.5 X6 <-
        1100
  3)    100 X1 + 25 X2 + 37.5 X3 +  20 X4 + 5 X5 + 7.5 X6 <= 300
  4)    X1 + X2 + X3 <= 5
  5)    X4 + X5 + X6 <= 1
END
GIN      6
        OBJECTIVE FUNCTION VALUE
        1)       168250.0
  VARIABLE          VALUE             REDUCED COST
        X1            1.000000       -48000.000000
        X2            1.000000       -24000.000000
        X3            3.000000       -30000.000000
        X4            0.000000       -10000.000000
        X5            0.000000        -5000.000000
        X6            1.000000        -6250.000000
       ROW    SLACK OR SURPLUS         DUAL PRICES
        2)            0.000000            0.000000
        3)           55.000000            0.000000
        4)            0.000000            0.000000
        5)            0.000000            0.000000
 NO. ITERATIONS=        57
```

图 3-30　修改了的农场问题中有 100 英亩-英尺的额外用水时的最优解

```
MAX   48000 X1 + 24000 X2 + 30000X3 + 10000X4 + 5000 X5 + 6250 X6
SUBJECT TO
  2)    375 X1 + 125 X2 + 187.5 X3  + 75 X4 + 25 X5 + 37.5 X6 <- 950
  3)    100 X1 + 25 X2 + 37.5 X3 +  20 X4 + 5 X5 + 7.5 X6 <= 300
  4)    X1 + X2 + X3 <= 5
  5)    X4 + X5 + X6 <- 1
END
GIN      6
        OBJECTIVE FUNCTION VALUE

        1)       154000.000

  VARIABLE          VALUE              REDUCED COST
        X1            1.000000       -48000.000000
        X2            4.000000        24000.000000
        X3            0.000000       -30000.000000
        X4            1.000000       -10000.000000
        X5            0.000000        -5000.000000
        X6            0.000000        -6250.000000
       ROW    SLACK OR SURPLUS         DUAL PRICES
        2)            0.000000            0.000000
        3)           80.000000            0.000000
        4)            0.000000            0.000000
        5)            0.000000            0.000000
 NO. ITERATIONS-        4
```

图 3-31　修改了的农场问题中可用水量有 50 英亩-英尺的减少时的最优解

在一块 120 英亩的地块上种玉米，在四块 120 英亩的地块上种小麦，在较小的 25 英亩的地块上种玉米，而不种燕麦. 我们用掉了所有的水和土地，但有每周 80 人-小时的劳力剩余. 预期的总收益为 154 000 美元，这仅比原来的解少了 2 250 美元. 这显示了 IP 问题的解的不可预期的特点. 可用水量的 5%的减少使得我们的种植方案从到处都种燕麦变成了没有地块种燕麦. 106

主要的稳健性问题是离散和连续最优化之间的关系. 我们已经看到了在大地块上种植单一作物对最优种植方案的显著影响. 现在我们回到开始的农场问题，考察改变最小的地块的尺寸对解的影响. 表 3-4 给出了用 LINDO 求出的在几个不同的最小地块的尺寸下的解. 例如，当最小地块的尺寸为 2 英亩时，我们的问题为在集合 107

$$
\begin{aligned}
6.0x_1 + 2.0x_2 + 3.0x_3 &\leqslant 1\ 000 \\
1.6x_1 + 0.4x_2 + 0.6x_3 &\leqslant 300 \\
x_1 + \quad x_2 + \quad x_3 &\leqslant 312
\end{aligned}
\tag{34}
$$

表 3-4 农场问题中在不同的最小地块尺寸下的最优种植计划的比较

最小地块的尺寸(英亩)	玉米(英亩)	小麦(英亩)	燕麦(英亩)	收益(美元)
0	187.5	437.5	0	162 500
1	42	1	582	162 500
2	188	436	0	162 400
5	45	10	570	162 500
10	190	430	0	162 000
20	60	40	520	162 000
50	200	400	0	160 000
100	200	400	0	160 000
125	125	250	250	162 500
150	150	300	150	157 000
200	200	400	0	160 000
250	250	250	0	150 000
300	0	0	600	150 000
500	0	0	500	125 000

上对总收益 $y=800x_1+400x_2+500x_3$ 求最大值，其中 x_1，x_2，x_3 为非负整数，表示种植玉米、小麦和燕麦的 2 英亩的地块的数目. 图 3-32 为用 LINDO 求出的最小地块尺寸为 2 英亩时的最优解. 最优解为种 94 块玉米(即总数为 $2\times94=188$ 英亩)，种 218 块小麦(436 英亩)，不种燕麦. 在这个模型中，我们在剩余的土地中不种作物，因此对最小地块的尺寸为 2 英亩的情况，会有 1 英亩的土地没有种作物. 表 3-4 中的最优解随着最小地块尺寸的增加变化得非常显著. 回忆一下前面的连续优化模型(LP)，有两个顶点达最优解，分别为：$(x_1, x_2, x_3)=(187.5, 437.5, 0)$，及 $(x_1, x_2, x_3)=(41.6\overline{6}, 0, 583.3\overline{3})$，达到的最优收益 108

为 $y=162\ 500$. 对最小地块尺寸小的情况，最优的种植方案在对这两个解的离散近似之间跳跃. 对最小地块尺寸为 2、10、50 英亩的情况，解与原来的玉米-小麦种植方案相似，对最小地块尺寸为 1、5、20 英亩的情况，解与另一个玉米-燕麦种植方案相似. 当最小地块尺寸变大时，最优种植方案和预期收益都有相当大的变化. 大的最小地块尺寸既可能得到多的收益，也可能得到少的收益. 例如，当地块尺寸为 125 英亩时得到的方案与原来的预期总收益 162 500 美元相同. 注意这时 625 英亩的可用土地可以平均地分为 5 个 125 英亩的地块，最优解$(x_1, x_2, x_3)=(125, 250, 250)$落在(29)式给出的使原 LP 问题达最优解的线段上. 但是大多数大尺寸地块情况给出了比较小的预期收益，而且种植方案变化很大.

```
MAX      800 X1 + 400 X2 + 500 X3
SUBJECT TO
        2)    6 X1 + 2 X2 + 3 X3 <=    1000
        3)    1.6 X1 + 0.4 X2 + 0.6 X3 <=    300
        4)    X1 + X2 + X3 <=    312
END
GIN      3

       OBJECTIVE FUNCTION VALUE

       1)       162400.0

VARIABLE        VALUE           REDUCED COST
      X1        94.000000       -800.000000
      X2       218.000000       -400.000000
      X3         0.000000       -500.000000

     ROW     SLACK OR SURPLUS    DUAL PRICES
      2)         0.000000         0.000000
      3)        62.399998         0.000000
      4)         0.000000         0.000000

NO. ITERATIONS=          2
```

109

图 3-32 农场问题中最小地块的尺寸为 2 英亩时的最优解

现在考虑 LP 问题的几何特点和其不同的 IP 近似. 当我们选择了一个最小地块尺寸后，就将可行域限制成为了整数点的网格结构. 如果地块的尺寸小，那么这样的整数格点有很多，他们可以覆盖可行域的绝大部分. 在某种意义上讲，在可行域的每个点附近都有一个格点. 由于目标函数是连续的，我们可以找到 IP 的一个格点解，它接近 LP 的最优解. 但当格点分布的距离大时，由于在 LP 的最优解附近可能没有格点，离散化常常会显著地改变最优解. 一般而言，只要格点之间的跳跃(在我们的例子中为最小地块尺寸)相对于决策变量是小比例的改变，离散造成的差别就较小. 否则，IP 的解会与相应的 LP 松弛的解有很大的不同.

例 3.7 仍考虑例 3.5 中的土方问题. 在使用 10 立方码载重量的自动倾卸卡车运输的情况下，公司已经确定了最优的运输方案. 公司又有三辆更大的卡车可用于运输，载重量为 20 立方码. 使用这些车辆可能会在运输中节省一些资金. 载重 10 立方码的卡车平均用 20 分钟装车，5 分钟卸车，每小时平均开 20 英里，费用为每英里单位重量 20 美元；载重 20 立方码的卡车平均用 30 分钟装车，5 分钟卸车，每小时平均开 20 英里，费用为每英里单位重量 30 美元，为最大限度地节约运输费用，应如何安排车辆的使用?

我们采用五步方法. 第一步为提出问题. 现在的问题是哪条路上使用哪种车辆. 表 3-5 中为我们在例 3.5 中求出的最优路线. 一共有 5 条不同长度的路线，运输土方的总量也是不同的. 我们假设在每条路上使用 10 立方码的卡车或 20 立方码的卡车，但二者不在一条路上同时使用. 由于较大的卡车的运量是较小的两倍，而费用却不到两倍，我们希望将这些卡车安排到可以节约资金最多的路线上. 我们需要对每条路线和每种类型的卡车计算出需要卡车的数量和运输的总费用，然后计算在每条路上使用大卡车可能节约的资金数额. 在最优的运输方案中，需要从地点 1 向地点 B 运 125 立方码的土方，距离为 2 英里. 这样小卡车需要 20 分钟装车，5 分钟卸车，按每小时 20 英里要开 6 分钟，因此每运一次要 31 分钟. 假设每个工作日是 8 小时，这样每天每辆卡车的工作时间不超过 480 分钟. 为运走 125 立方码的土方，需要运 13 次，共需 $13\times31=403$ 分钟，因此对路线 1 一辆小卡车就够用了. 一辆小卡车在路线 1 上运输的费用为 [110]

$$13\text{ 次}\times\frac{2\text{ 英里}}{\text{次}}\times\frac{20\text{ 美元}}{\text{英里}}=520\text{ 美元}.$$

表 3-5 例 3.7 中卡车问题的运输路线数据

路线	从	到	英里数	运量(立方码)
1	1	B	2	125
2	2	A	4	175
3	3	C	4	225
4	3	D	4	100
5	4	D	4	350

大卡车需要 30 分钟装车，5 分钟卸车，在路线 1 上要开 6 分钟，因此每运一次要 41 分钟. 为运走 125 立方码的土方，需要运 7 次，共需 $7\times41=287$ 分钟. 从而对路线 1 一辆大卡车就够用了. 一辆大卡车在路线 1 上运输的费用为

$$7\text{ 次}\times\frac{2\text{ 英里}}{\text{次}}\times\frac{30\text{ 美元}}{\text{英里}}=420\text{ 美元}.$$

在路线 1 上可以节约的费用为 100 美元. 类似地算出在其他的路线上节约的费用和需要的卡车数. 第一步的结果表示在图 3-33 中.

变量：

$x_i=1$ 如果在路线 i 上使用大卡车

$x_i=0$ 如果在路线 i 上使用小卡车

T=用的大卡车总数

y=节约的总费用(美元)

假设：

$T=1x_1+1x_2+2x_3+1x_4+2x_5$

$y=100x_1+360x_2+400x_3+200x_4+640x_5$

$T\leqslant 3$

目标：求 y 的最大值

图 3-33 卡车问题的第一步的结果

第二步为选择建模方法．我们采用二值整数规划模型(BIP)来处理这一问题．BIP 问题是决策变量为二值数码的 IP 问题，只可以取整数值 0 或 1．通常用 BIP 问题来表现是/否决策．其典型应用包括分配问题、时间安排、设备位置及投资问题．BIP 问题有比通常的 IP 问题算法快得多的特殊的算法．对本书中的小型 BIP 问题，任何 IP 或 BIP 求解工具都是可以的．

[111]

第三步是将问题用标准形式表示．图 3-34 给出了这个问题的电子数据表格表示．D 列包含二进制决策变量 x_i：如果用小卡车则取 0，用大卡车则取 1．E 列为使用的大卡车的数量，F 列计算出节约的费用．比如：$E3=B3*D3$，$F3=C3*D3$，$E8=E3+\cdots+E7$．我们用电子表格的最优化工具对总节约费用 $F8=F3+\cdots+F7$ 求最大值，要求满足约束 $E8\leqslant B8$，$D3$ 到 $D7$ 为二值整数．

A	A	B	C	D	E	F
1		可能			实际	
2	路线	卡车	节约	决策	卡车	节约
3	1	1	100	0	0	0
4	2	1	360	0	0	0
5	3	2	400	0	0	0
6	4	1	200	0	0	0
7	5	2	640	0	0	0
8	可用数	3		总数	0	0

图 3-34 卡车问题的电子数据表格表示

[112]

第四步为求解问题．图 3-35 为电子表格的优化工具求出的每条路线上所用卡车的最优安排方案．最优值 $y=1\,000$ 由取 $x_2=1$，$x_5=1$ 及 $i=1,3,4$ 的 $x_i=0$ 时得到．第五步为回答问题．我们想知道如何利用 20 立方码的大卡车来节约运输费用．在路线 2 上用一辆大卡车，在路线 5 上用另两辆大卡车每天就可以节省约 1 000 美元．

A	A	B	C	D	E	F
1		可能			实际	
2	路线	卡车	节约	决策	卡车	节约
3	1	1	100	0	0	0
4	2	1	360	1	1	360
5	3	2	400	0	0	0
6	4	1	200	0	0	0
7	5	2	640	1	2	640
8	可用数	3		总数	3	1 000

图 3-35　卡车问题的电子数据表格解

灵敏性分析要讨论的第一个问题是可能节约的资金与可用的大卡车的数量的关系．公司可能有其他可以重新安排的大卡车，或可以租来另外的大卡车．也可能对自己拥有的卡车有其他在考虑中的计划，因此我们要讨论可用的大卡车数量增加或减少的影响．表 3-6 是灵敏性分析运行后的结果．对每一种情况，我们改变单元格 *B*8 中的约束重新求最优解．我们记录了最优的决策(在哪条路上用大卡车)和预计节约的运费．节省的边际费用也列在表中．例如：公司用四辆大卡车可以节省 1 200 美元，或用五辆大卡车可以节省 1 400 美元，因此四辆车每天可多节省 200 美元．如果公司能以每天低于 200 美元的价格获得 1 辆、2 辆或 3 辆额外的大卡车，公司就可以节约资金．在另一方面，如果公司有另一个计划，在其中大卡车可以节省的金额每天超过 360 美元，则在当前的运输方案中用较少的大卡车比较好．节约的边际费用类似于影子价格，因为他们都给出了约束每改变一个单位的可能的影响．

113

表 3-6　卡车问题中可用的大卡车数量的灵敏性

卡车数	路线	节省的费用(美元)	节省的边际费用(美元)
1	2	360	360
2	5	640	280
3	2，5	1 000	360
4	2，4，5	1 200	200
5	2，3，5	1 400	200
6	2，3，4，5	1 600	200
7	所有的路线	1 700	100

下面我们来讨论每条路上可能节约的费用发生变化的影响．现在我们估计在路线 5 上使用两辆大卡车可以每天为公司节约 640 美元．从另一个角度看就是路线 5 上的每辆大卡车可以每天为公司节约 320 美元．在路线 3 和 4 上的每辆大卡

车每天节约 200 美元，在路线 1 上的每辆大卡车每天节约 100 美元．在路线 5 上节约的费用的小改变不会影响我们得出的在路线 2、5 使用大卡车的最优解的结论，这一点看起来是合理的．为验证这个结论，我们改变单元格 C7 的值重新求最优解．任何一个大于 400 的值都会得到同样的最优决策，小于 400 的值会使我们将大卡车安排到路线 2 和 3 上．

在稳健性分析的部分，我们要说明二值的约束可以用来限制可能的决策．假设管理层决定大卡车不可以用在路线 2 上，因为大卡车会在线路附近造成公众关系问题．我们可以将问题重新表述，从而把这一可能排除在外，但在现在的问题中添加约束 $x_2=0$ 要容易得多．现在的最优解为在路线 4、5 上使用大卡车，可以节约的总额为 840 美元．这一政治上的让步耗费了公司每天 160 美元．现在再来假设，出于类似的政治原因，管理层决定如果在路线 4 上使用大卡车，那么在路线 3 上也一定要使用大卡车．这个政策可以通过在我们的问题中添加约束 $x_3\geqslant x_4$ 或 $x_3-x_4\geqslant 0$ 来表示．如果我们只添加这一个约束，最优解不会改变，因为原来的最优决策已经满足了这个额外的约束．（我们不在他们中任一条路线上使用大卡车．）如果要求这两个约束都满足，则最优解为在路线 3 和 4 上都使用大卡车，可以节约的总额为每天 600 美元．

114

3.5　习题

1. 仍考虑例 1.1 中的售猪问题，但现在假设 t 天后猪的价格为 $p=0.65e^{-(0.01/0.65)t}$ 美元/磅．
   (a)说明在 $t=0$ 时猪的价格为每天下降 1 美分．当 t 增加时会有什么变化？
   (b)求这个售猪问题的最优解．采用五步方法和单变量最优化模型．
   (c)参数 0.01 代表时间 $t=0$ 时价格的下降率．对这一参数进行灵敏性分析，考虑最佳售猪时间和相应的净收益．
   (d)比较(b)的结果和我们在 1.1 节中得出的结果．讨论我们现在的模型的稳健性．
2. 仍考虑例 1.1 中的售猪问题，但现在假设 t 天后猪的重量为 $w=800/(1+3e^{-t/30})$ 磅．
   (a)说明在 $t=0$ 时猪增重约为每天 5 磅．当 t 增加时会有什么变化？
   (b)求这个售猪问题的最优解．采用五步方法和单变量最优化模型．
   (c)参数 800 代表猪长成时的最终重量．对这一参数进行灵敏性分析，考虑最佳售猪时间和相应的净收益．
   (d)比较(b)的结果和我们在 1.1 节与 3.1 节中得出的结果．讨论这个模型的稳健性．我们可以得出什么一般性的结论？
3. 一个用来测定两种可选择的治疗方法的效果差异的统计算法要求在集合

$$S=\{(p_1,p_2):p_1-p_2=\Delta;p_1,p_2\in[0,1]\}$$

上求

$$\sum_{(k_1,k_2)\in E}\binom{n_1}{k_1}p_1^{k_1}(1-p_1)^{n_1-k_1}\binom{n_2}{k_2}p_2^{k_2}(1-p_2)^{n_2-k_2}$$

115

的最大值

其中 E 为如下集合的一个子集

$$E_0=\{(k_1,k_2):k_1=0,1,2,\cdots,n_1;k_2=0,1,2,\cdots,n_2\}$$

并有 $\Delta\in[-1,1]$. 求当 $n_1=n_2=4$, $\Delta=-0.1$,

$$E=\{(0,4),(0,3),(0,2),(0,1),(1,4),(1,3),(2,4)\}$$

时的最大值.

[Santner，T. 和 Snell，1980].

4. 一种评估正在研制的治疗外伤和烧伤药效果的方法需要在集合

$$\{(p_1,\cdots,p_n):a_i\leqslant p_i\leqslant b_i,\quad\forall i=1,\cdots,n\}$$

上对函数

$$f(p_1,\cdots,p_n)=\frac{(A-\sum_{i=1}^{n}p_i)}{\sqrt{B+\sum_{i=1}^{n}p_i(1-p_i)}}$$

求最大值. 对 $n=2$, $A=-5.92$, $B=1.58$, $a_1=0.01$, $b_1=0.33$, $a_2=0.75$, $b_2=0.85$ 求 f 的最大值. [Falk 等，1992].

5. 仍考虑第 2 章的习题 3 中的竞争种群问题. 设捕捞努力量 E 船-天会导致年捕获蓝鲸 qEx，长须鲸 qEy，其中设参数 q(可捕量)近似等于 10^{-5}. 设捕捞努力量参数取常数，假设种群水平稳定在捕捞率与增长率相等的数量.

(a)假设捕鲸远征的费用为 250 美元每船-天. 求使捕鲸产业的长期收益达最大的捕捞努力量的最优值. 采用五步方法和单变量最优化模型.

(b)讨论可捕量 q 的灵敏性. 考虑收益，捕捞力度，最终稳定下来的鲸鱼种群数量.

(c)技术的增加会提高鲸鱼的捕捞量，这对鲸鱼种群数量和捕鲸产业有什么长期影响?

6. 仍考虑例 3.2 中的消防站位置问题，但现在假设从点(x_0, y_0)到点(x_1, y_1)的响应时间正比于所走的路线的距离 $|x_1-x_0|+|y_1-y_0|$.

(a)求使平均响应时间最少的消防站位置. 采用五步方法和多变量无约束优化模型.

116

(b)讨论最优位置关于对每一个 2×2 英里区域估计出的紧急求救次数的灵敏性. 你是否能得出什么一般性的结论?

(c)讨论模型的稳健性. 与第 3.2 节的分析中得到的最优位置相比较. 如果我

们假设响应时间正比于两点之间的直线距离 $r=\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2}$，你认为会发生什么情况？

7. 仍考虑例 2.1 中的彩电问题. 但现在不用我们在第 2 章使用的解析法，而是用数值方法.
   (a)求使第 2 章的(2)式给出的目标函数 $f(x_1, x_2)$达最大的生产量 x_1，x_2. 使用两个变量的牛顿法
   (b)与 2.1 节一样，定义 a 为 19 英寸彩电的价格弹性系数. 在(a)中我们取 $a=0.01$. 现在假设 a 增加 10%到 $a=0.011$，再来求解(a)中的最优化问题. 用你的结果对灵敏性 $S(x_1, a)$，$S(x_2, a)$，$S(y, a)$做出数值的估计. 与 2.1 节中得到的解析结果进行比较.
   (c)设 b 为 21 英寸彩电的价格弹性系数. 现在 $b=0.01$. 同(b)中一样，用数值方法估计 x_1，x_2 和 y 关于 b 的灵敏性.
   (d)比较本练习中的数值方法和 2.1 节中所用的解析方法. 你更喜欢哪一个，为什么?

8. 仍考虑第 2 章的习题 6 中的问题. 但现在假设管理层被说服后同意提高广告费用的最高限额. 对我们现在讨论的广告预算在一个很大的范围内变化的情况，关于销售额随广告预算是线性变化的假设就不够合理. 现在假设每当广告预算加倍时，销售额提高 1 000 台.
   (a)求使利润达最高的价格和广告预算. 采用五步方法和无约束最优化模型.
   (b)讨论决策变量(价格和广告预算)关于价格弹性系数(数据 50%)的灵敏性.
   (c)讨论决策变量关于广告商估计的每当广告预算加倍时，销售额提高 1 000 台这一数据的灵敏性.
   (d)如果在(a)中假设广告预算和销售额是线性关系时会有什么错误? 为什么它在第 2 章的习题 6 中不是问题?

9. (接习题 8)假设另一个广告支出与销售额之间关系的模型. 假设广告预算加倍时，销售额提高 1 000 台，但再次加倍后，销售额只提高 500 台，并一直满足这样的关系. 重复习题 8 中(a)到(c)的部分. 在(c)中，讨论关于第一次广告预算加倍时，销售额提高 1 000 台这一数据的灵敏性. 将你的结果与在习题 8 中得到的结果相比较，并讨论模型的稳健性.

117

10. 仍考虑第 2 章的习题 7 中的报纸问题. 现在我们要对利润率(利润占收入的百分比)求最大值. 假设每周的经营开支仍固定为 200 000 美元.
   (a)求使利润率最大的报纸订阅价格和广告价格. 采用五步方法和无约束最优化模型. 用随机搜索方法求一个近似解.
   (b)记 $z=f(x, y)$为你在(a)中得到的目标函数. 用某个计算机代数系统求

$F=\partial f/\partial x$ 与 $G=\partial f/\partial y$，再求 $\partial F/\partial x$，$\partial F/\partial y$ 和 $\partial G/\partial x$，$\partial G/\partial y$.

(c)用两个变量的牛顿法求(a)中问题的一个高精度的解. 取(a)中得到的近似解为初值. 算法中需要的导数已在(b)中算出.

(d)如果你在前面没有求过第 2 章的习题 7 中(a)部分，现在来完成. 可以选用任何一种方法. 将结果与你在(c)中刚刚得到的解相比较. 我们求最大利润或最大利润率是否有区别? 为什么?

11. 仍考虑例 3.3 中的草坪椅问题. 注意当 x 和 y 接近零时目标函数 $f(x, y)$ 趋于无穷大，而且 $f(x, y)$ 在构成可行域边界的直线 $x=0$ 和 $y=0$ 上没有定义. 从而可以推测价格弹性系数的估计当外推到 $x=0$ 或 $y=0$ 时是不准确的.

(a)通过修改可行域来改善这个模型的缺陷.

(b)讨论你在(a)中所做决策的稳健性.

(c)对你修改后的模型，说明最优解出现在可行域的内部. 在边界上给出任意一个 $f(x, y)$ 的局部最大值，说明在每一个这样的点，∇f 指向可行域的内部.

12. 仍考虑第 2 章的习题 9 中的报纸问题. 用计算机按线性规划模型求解. 回答原问题中的(a)、(b)、(c).

13. 仍考虑第 2 章的习题 10 中的货运问题. 用计算机按线性规划模型求解. 回答原问题中的(a)、(b)、(c).

118

14. 仍考虑例 2.2 中的彩电问题. 将条件简化为公司从每台 19 英寸彩电可获利润 80 美元，每台 21 英寸彩电可获利润 100 美元.

(a)求最优的生产量. 采用五步方法，用计算机按线性规划模型求解.

(b)求每个约束的影子价格，并解释他们的含义. 哪些约束是最优解的关键约束?

(c)讨论目标函数系数(每台彩电的利润)的灵敏性. 同时考虑利润和最优的生产量.

(d)画出可行域的图形(见图 2-10)，并画出在最优值点的∇f. 从几何上描述当目标函数的一个系数变化时向量∇f 有什么变化. 利用几何观点确定使当前的最优解仍保持最优的目标函数的每个系数的变化范围.

15. 伯明翰纺织公司在美国南部有三个纺织厂，有四个配送中心分别位于密歇根、纽约、加利福尼亚和乔治亚州. 表 3-7 中列出了每个工厂的年输出量的估计值、给每个仓库的分配量和运输费用.

(a)求使总运费最少的运输方案. 采用五步方法，用计算机按线性规划模型求解.

(b)求每个输出约束的影子价格. 将一家纺织厂的生产量转到另一家是否有利? 公司愿意付出多少费用来促成这一生产量的转变?

表 3-7 习题 15 中的运输问题的数据：每车的运费(美元)

纺织厂	运输中心 密歇根	纽约	加利福尼亚	乔治亚	输出
1	430	550	680	700	105
2	510	590	890	685	160
3	395	425	910	450	85
分配量	70	100	105	75	

16. 一家个人计算机制造厂出售三种台式机. 型号 A 的制造费用为 850 美元，售价为 1 250 美元. 型号 B 的制造费用为 950 美元，售价为 1 400 美元. 型号 C 的制造费用为 1 500 美元，售价为 2 500 美元. 公司每月购买 10 000 个台式机箱，每台计算机需要一个机箱. 型号 A 和 B 采用 15 英寸的显示器，公司每个月能得到 5 000 台这种显示器. 型号 C 采用 17 英寸的显示器，每个月可有 7 500 台. 其他配件的供应充足. 公司每月有 20 000 小时的生产时间. 生产每台 A、B、C 型号的计算机分别需要 1 小时、1.25 小时和 1.75 小时.

119

   (a)公司应该生产每种型号的计算机各多少台. 采用五步方法，按线性规划模型求解.

   (b)求每个约束的影子价格. 针对本问题解释每个影子价格的含义.

   (c)下一个月公司计划将型号 C 按 2 199 美元的价格降价出售. 这一改变会如何影响(a)和(b)的结果?

   (d)公司考虑生产一种新的台式机 D. 其制造费用为 1 250 美元，售价将为 1 895美元. 每台需要台式机箱一个，17 英寸显示器一台和 1.5 小时的生产时间. 这一改变会如何影响(a)和(b)的结果? 你是否会建议公司继续推行其引入新产品的计划?

17. 一个退休的工程师有 250 000 美元用于投资，她每周愿意用 5 小时的时间来管理自己的投资. 市政债券每年有 6%的收益而且不需要管理. 房地产投资预计每年可增值 8%，每 100 000 美元的投资需要 1 小时的管理时间. 蓝筹股每年可获利 10%，需要 1.5 小时的管理时间. 后保债券可获利 12%，需要 2.5 小时的管理时间. 谷物期货可获利 15%，每 100 000 美元的投资需要 5 小时的管理时间.

   (a)这个退休工程师应如何投资以获得最高的预期收益? 采用五步方法，按线性规划模型求解.

   (b)求每个约束的影子价格. 针对本问题解释每个影子价格的含义.

   (c)这个退休工程师从互联网上下载了软件，使她可以对每 100 000 美元的期货投资每周只用 3 小时的时间有效地管理. 这个变化会对(a)和(b)的结果有什么影响?

(d)在经过期货市场的几次损失之后，工程师认定风险是她的投资策略的一个重要因素．一本投资自助书将市政债券、房地产投资、蓝筹股、后保债券及谷物期货的风险因子分别列为：1、4、3、6 和 10．工程师决定她投资的平均风险因子不能超过 4．这个变化会对(a)和(b)的结果有什么影响？

18. 绿色供给公司生产塑料食品袋和牛奶壶．公司每周可以分别以每 100 磅 18 美元、12 美元、10 美元的价格获得 5 000 磅的旧塑料袋、18 000 磅的用过的牛奶壶和 40 000 磅的工业废塑料．公司每周有 4 000 箱的塑料袋和 80 000 个牛奶壶的订单．每箱塑料袋需要 6 磅塑料，生产费用为 5 美元，售价为 14 美元．每 100 个牛奶壶需要 14 磅塑料，生产费用为 9 美元，售价为 20 美元．由于消费者的选择，塑料袋至少要使用 25%的再生的回收塑料(用过的牛奶壶和袋子)．而为达到强度要求，牛奶壶至多使用 50%的再生回收塑料． [120]

(a)求每种产品使用塑料的最优组成．采用五步方法，按线性规划模型求解．

(b)求每个约束的影子价格．针对本问题解释每个影子价格的含义．

(c)一家新的供货商可以按每 100 磅 8 美元的价格提供工业废塑料．这一变化如何影响(a)和(b)的结果？

(d)一家新的客户提出按每 100 个 30 美元购买 40 000 个环保的牛奶壶．但牛奶壶至少要使用 35%的再生回收塑料．这一改变如何影响(a)和(b)的结果？公司是否会接受这个新的客户？

19. 仍考虑考虑例 3.5 中的土方问题．假设公司只运输整车的土方．

(a)假设公司使用载重 10 立方码的自动倾卸卡车运输，求最优运输方案．采用五步方法，按整数规划模型求解．

(b)假设车的载重量为 5 立方码，重复(a)的计算．

(c)假设车的载重量为 20 立方码，重复(a)的计算．

(d)比较(a)、(b)、(c)的结果，讨论原来线性规划模型的稳健性．例 3.5 中的运输方案是否对任一种卡车都是近似最优的？

20. (习题 14 的修正)仍考虑例 2.2 中的彩电问题．将条件简化为公司从每台 19 英寸彩电中可获利润 80 美元，每台 21 英寸彩电可获利润 100 美元．在这个问题中我们要讨论离散对最优解的影响．

(a)求最优的生产量．采用五步方法，用计算机按线性规划模型求解．

(b)由于大规模生产，彩电实际上是按 30 台一批生产．求使利润最高的最优批量．用计算机按整数规划模型求解．

(c)假设每批数量分别为 10、20、50、100、200 和 300 重复(b)的计算．对每种情况，用整数规划计算每种彩电的最优批量．

(d)比较(a)、(b)、(c)的结果，讨论(a)中原始线性规划模型的解的稳健性．

121 可行域的离散化是如何影响最优解的？同时考虑最优生产量和最优利润.

21. (习题 15 的修正)伯明翰纺织公司在美国南部有三个纺织厂，有四个配送中心分别位于密歇根、纽约、加利福尼亚和乔治亚州. 表 3-7 中列出了每个工厂的年输出量的估计值，给每个仓库的分配量和运输费用.
    (a)求使总运费最少的运输方案. 采用五步方法，用计算机按线性规划模型求解.
    (b)公司购买了三辆新卡车用于运输. 新卡车的燃油利用率高，预计可以节约 50%的运输费用. 假设一辆卡车一周可以运一次(一年 52 次)，在每一条路线上或全用旧卡车或全用新卡车. 公司应该如何利用这些新卡车从而使节省的费用达最高？采用五步方法，用计算机按整数规划模型求解.
    (c)对新卡车的数量进行灵敏性分析. 对新卡车数量 n 取 4、5、6、7 分别求最优运输方案和预计节省的费用. 如果每辆新卡车按其使用年限每年需分期付费 12 000 美元，公司应该购买多少辆新卡车？
    (d)由于加利福尼亚州对卡车制订了新的污染标准，公司一定要在加州使用新卡车运输. 这一改变如何影响(b)和(c)的结果？这一新政策会使公司付出多少费用？

22. 仍考虑习题 21 的纺织品运输问题. 但现在假设在同一条路线上，新、旧卡车都可以使用. 再来解答前面的问题.（提示：用一个决策变量表示一辆新卡车是否在路线 i 上使用，再用另一个决策变量表示第二辆卡车是否使用，其他类似.）

23. 一个计算机操作系统在硬盘上存储文件. 有五个大小分别为 18、23、12、125 和 45Mb 的大文件要存储. 连续的存储块的容量分别为 25、73、38 和 156Mb. 每一个文件一定要存在一个连续的存储块中. 在这个问题中，我们要研究一种整数规划算法，从而将文件分配到存储块中.

122 (a)为了保留大的连续存储块以备将来使用，我们希望将每一个文件存在能够容纳它的最小的存储块中. 定义将文件 i 存在块 j 上的费用为块 j 的大小. 求使总费用最少的分配方案. 采用五步方法，按整数规划模型求解.
    (b)假设 12Mb 的文件扩大为 19Mb. 这会如何影响(a)中求出的最优解？这个 12Mb 的文件可以扩大多少而最优解仍保持不变？
    (c)假设 18Mb 和 23Mb 的文件由于被在同一个程序所使用，要求将他们存在同一个存储块中. 这会如何影响(a)中求出的最优解？
    (d)一个分配文件到存储块的“贪心”算法是将每一个文件存到第一个可以容纳它的存储块中. 应用这一算法(手算)并与(a)的结果相比较. 在(a)中求得的整数规划问题的解是否显著地优于贪心算法的结果？
    (e)为什么不采用对剩余的最大连续存储块的大小求最大值的方法？这一优

化问题是否可以按整数规划求解?

24. 一个技术管理人员安排一些工程师完成几个计划的项目. 项目 A、B、C 分别需要 18、12 和 30 人-月来完成. 工程师 1、2、3 和 4 可以完成这些项目. 他们每个月的工资分别为 3 000 美元、3 500 美元、3 200 美元和 3 900 美元.
(a)求完成所有项目的总费用最小的分配方案(分配工程师到具体项目). 假设工程师在每 6 个月中只能被安排一个项目, 所有项目要求只能在 18 个月内完成. (提示: 用决策变量 x_{ijk} 表示工程师 i 是否在时期 k 内完成项目 j.)
(b)假设由于早期的工作安排, 工程师 1 在时期 2 内没有时间. 重复(a)的计算. 这会如何影响最优解? 多少费用会使管理人员认为应该将工程师 1 重新安排到时期 2 中?
(c)假设由于个性冲突, 工程师 2 和 3 不能一起工作. 他们的个人矛盾会使公司付出多少费用?
(d)如果项目 A 能够在 6 个月内完成, 公司会发 10 000 美元的奖金. 这会如何改变最优解?

3.6 进一步的阅读文献

Beltrami, E. (1977). *Models for Public Systems Analysis*, Academic Press, New York.

Dantzig, G. (1963). *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

Falk, J., Palocsay, S., and Sacco, W. (1992). Bounds on the Trauma Outcome Function via Optimization, *Operations Research* 40, Supp. No. 1, S86–S95.

Gearhart, W. and Pierce, J. *Fire Control and Land Management in the Chaparral*, UMAP module 687.

Hillier, F. and Lieberman, J. (1990). *Introduction to Operations Research*, McGraw–Hill, New York.

Maynard, J. *A Linear Programming Model for Scheduling Prison Guards*, UMAP module 272.

Polack, E. (1971). *Computational Methods in Optimization*, Academic Press, New York.

Press, W., Flannery, B., Teukolsky, S., and Vetterling, W. (1987). *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, New York.

Santner, T. and Snell, M. (1980). Small-Sample Confidence Intervals for $\rho_1 - \rho_2$ and ρ_1/ρ_2 in 2×2 Contingency Tables, *Journal of the American Statistical Association* 75, 386–394.

Straffin, P. *Newton's Method and Fractal Patterns*, UMAP module 716.

123 ~ 124

第二部分　动态模型

许多有趣的实际问题包含着随时间发展的过程。动态模型被用于表现这些过程的演变。空间飞行，电路，化学反应，种群增长，投资和养老金，军事战斗，疾病传播和污染控制正是广泛地运用动态模型的众多领域中的几个领域。

五步方法和灵敏性分析及稳健性的基本原则对动态模型是有意义的并且是有用的，正如它们对于最优化模型一样。在我们探讨一些最流行和最一般的动态建模技巧时，我们将继续采用这些方法。在这一部分中我们还将介绍状态空间、平衡态和稳定性等重要的建模概念。所有这些在本书的第三部分即最后一部分都非常有用，在那里我们探讨随机模型。

第4章　动态模型介绍

一般来讲，动态模型易于构造但难于求解. 精确的解析解仅对很少的特殊情况存在，例如线性系统. 数值方法常常对系统行为不能提供一个好的定性的解释. 因此，图形表示通常成为分析动态模型不可缺少的一部分. 由于图形表示特有的简单性，以及它的几何性质，这一章也提供我们一个理想的机会介绍最深刻且最基本的动态系统建模的观点.

4.1　常态分析

在这一节我们将考虑形式最简单的动态模型. 只要求初等的数学. 尽管如此，这个模型的实际应用是大量的，而且减少过分复杂的技巧使得我们能够集中考虑动态建模最基本的思想.

例 4.1　在一个未被管理的森林，硬材树与软材树竞争可用的土地和水分. 越可用的硬材树生长得越慢，但是越耐用且提供越有价值的木材. 软材树靠生长快，有效消耗水分和土壤养分与硬材树竞争. 硬材树靠生长的高度与软材树竞争，它们遮挡了小树的阳光. 它们也更耐抗疾病. 这两种树能否同时在一片森林中共存，或者一种树是否会迫使另一种树灭绝?

126
~
127

我们将运用五步方法. 用 H 和 S 分别表示硬材树和软材树种群. 生物学家常用的方便的计量单位是生物量(每英亩上木材吨数). 我们需要对这两个种群的动态做一些假设. 开始，我们做的假设要尽可能简单且不忽略这个问题最基本的方面. 随后，如果需要的话，我们可以改进或丰富这个模型. 在无限制生长(丰富的空间、阳光、水分和土壤养料)的条件下，假设种群的生长率大致正比于种群的大小是合理的. 两倍数量的树木应产生两倍数量的小树. 当种群增长时，同一种类的成员必然会为资源竞争，这样就抑制了群体的增长. 因此，有理由假设小群体的增长率线性依赖于群体大小，并随着群体的增加而减小. 具有这种性质的最简单的增长函数是

$$g(P) = rP - aP^2.$$

这里 r 是内禀增长率. $a \ll r$ 是资源限制强度的度量. 如果 a 较小，就有更多的生长空间.

竞争也是由于资源的限制. 硬材树的存在限制了阳光、水分和其他对软材树有用的资源，反之也是如此. 由于竞争导致的增长率的损失依赖于两个种群的大小. 一个简单的假设是这个损失正比于两者的乘积. 给出这些关于生长和竞争的假设，我们希望知道是否可以预测到一个种群的灭绝. 图 4-1 总结了第一步的结果.

变量：

H=硬材树种群(吨/英亩)

S=软材树种群(吨/英亩)

g_H=硬材树的生长率(吨/英亩/年)

g_S=软材树的生长率(吨/英亩/年)

c_H=与硬材树竞争的损失(吨/英亩/年)

c_S=与软材树竞争的损失(吨/英亩/年)

假设：

$g_H = r_1 H - a_1 H^2$

$g_S = r_2 S - a_2 S^2$

$c_H = b_1 SH$

$c_S = b_2 SH$

$H \geqslant 0$，$S \geqslant 0$

r_1，r_2，a_1，a_2，b_1，b_2 是正实数

目标： 确定是否有 $H \to 0$ 或 $S \to 0$.

图 4-1 树木问题的第一步结果

第二步是选择建模方法. 我们将这个问题构造成一个处于定常态的动态模型.

设函数

$$
\begin{gathered}
f_1(x_1, \cdots, x_n) \\
\vdots \\
f_n(x_1, \cdots, x_n)
\end{gathered}
$$

定义在$\mathbb{R}^n$ 的子集 S 上. 函数 f_1，…，f_n 分别表示每个变量 x_1，…，x_n 的变化率. 称集合 S 中的一个点$(x_1, \cdots, x_n)$为平衡点，如果在这点

128

$$
\begin{gathered}
f_1(x_1, \cdots, x_n) = 0 \\
\vdots \\
f_n(x_1, \cdots, x_n) = 0
\end{gathered} \tag{1}
$$

于是每个变量 x_1，…，x_n 的变化率为零，因此系统处于静止状态.

称 x_1，…，x_n 为状态变量，S 为状态空间. 因为函数 f_1，…，f_n 依赖系统的现实状态$(x_1, \cdots, x_n)$，现实状态完全确定系统的将来，而与过去发生的情况无关. 我们仅需要知道目前的状况，并不需要知道如何到达目前的状况. 当处于由方程(1)定义的平衡态时，我们称系统处于定常态. 在这一点所有的变化率为零. 作用在系统上的全部影响达到平衡. 因此方程(1)有时被称为平衡方程. 当一个系统处于定常态时，它将永远保持不变. 因为所有的变化率为零，在将来的任何时候系统都将停留在现在所在的状态.

为了求一个动态系统的平衡态，我们需要求解由方程(1)给出的具有 n 个未知数的 n 个方程. 对非常容易的情况我们可以手算. 有时我们可以用一个计算机

代数系统求解. 这一章的所有问题，包括习题，都可以应用这个技巧求解. 当然，许多实际问题导出的方程组没有解析解. 我们将在第 6 章处理这样的问题，讨论动态系统的计算方法.（另外，我们可以运用在第 3 章介绍的多变量牛顿方法.）

129

第三步是构造模型的公式. 记 $x_1=H$，$x_2=S$ 为两个状态变量，定义在状态空间

$$\{(x_1,x_2):x_1\geqslant 0,x_2\geqslant 0\}.$$

定常态方程为

$$\begin{aligned} r_1x_1-a_1x_1^2-b_1x_1x_2&=0\\ r_2x_2-a_2x_2^2-b_2x_1x_2&=0. \end{aligned}\tag{2}$$

我们对这个方程组在状态空间的解感兴趣. 这些解表示动态模型的平衡点.

第四步是求解模型. 从第一个方程约去因子 x_1，由第二个方程约去因子 x_2，我们得到四个解；三个解

$$(0,0)$$

$$\left(0,\frac{r_2}{a_2}\right)$$

$$\left(\frac{r_1}{a_1},0\right)$$

在坐标轴上，第四个在这两条直线

$$\begin{aligned} a_1x_1+b_1x_2&=r_1\\ b_2x_1+a_2x_2&=r_2. \end{aligned}$$

的交点. 参见图 4-2 作为说明.

由克拉默法则解得

$$x_1=\frac{r_1a_2-r_2b_1}{a_1a_2-b_1b_2}$$

$$x_2=\frac{a_1r_2-b_2r_1}{a_1a_2-b_1b_2}.$$

如果这两条线在状态空间内不相交，则只存在三个平衡点. 在这种情况下两个树种不能和平共存于平衡状态.

130

我们希望知道在什么条件下 $x_1>0$ 且 $x_2>0$. 有理由假设 $a_i>b_i$. 生长率是

$$r_ix_i-a_ix_ix_i-b_ix_ix_j,$$

其中第一项表示无限制的增长，第二项表示种群内竞争的影响，第三项表示种群间竞争的影响. 因为两种树不会占有完全相同的生态位，我们将假设对于 $x_i=x_j$（即种群内部）竞争影响更强. 因此 $a_i>b_i$，所以

$$a_1a_2-b_1b_2>0.$$

于是，共存的条件是

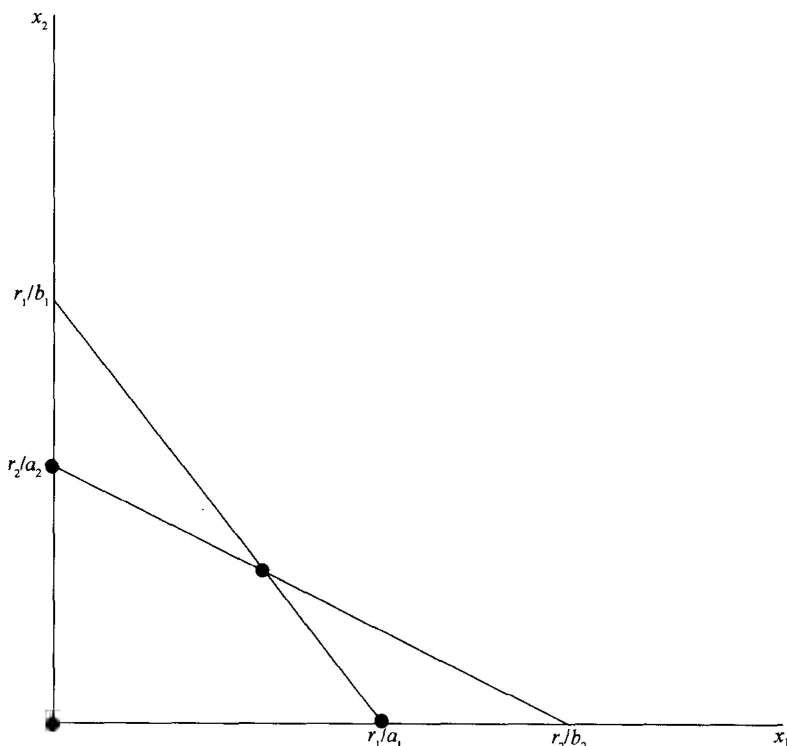
$$r_1a_2-r_2b_1>0$$

$$a_1 r_2 - b_2 r_1 > 0,$$

或者，换句话说，

$$\frac{r_2}{a_2} < \frac{r_1}{b_1} \text{ 且 } \frac{r_1}{a_1} < \frac{r_2}{b_2},$$

正如图 4-2 所示.



131

图 4-2 软木材树 x_2 与硬木材树 x_1 所表示的树木问题的平衡态

第五步是用通俗的语言表达从我们的模型分析获得的结果. 此时做到这一点有困难，因为我们的答案是有条件的，限制条件包含了未知参量. 为了清楚地表达得到的结果，我们希望找到共存条件的更切实的解释. 不妨重新检验模型的公式，看看我们是否能用直接的方法解释比率 r_i/a_i 和 r_i/b_i 的含义.

参数 r_i 表示增长趋势，参数 a_i 和参数 b_i 分别表示种群内和种群间的竞争强度. 因此，比率 r_i/a_i 和 r_i/b_i 必然表达了增长与竞争的相对强度. 进一步，在没有种群间的竞争时，增长率是

$$r_i x_i - a_i x_i^2 = x_i(r_i - a_i x_i).$$

比率 r_i/a_i 表示了在没有种群间的竞争时的平衡态种群水平，或者说是种群将停止增长的水平. 类似地，如果我们忽略种群内部的竞争，净增长率为

$$r_i x_i - b_i x_i x_j = x_i(r_i - b_i x_j).$$

于是比率 r_i/b_i 表示了要使 i 类种群灭绝，j 类种群必须达到的种群水平，由此，现在我们可以通过下面具体的解释给出分析结果.

对每种类型的树(硬材或软材)存在两类增长限制. 第一种是由于与另一种树的竞争，第二种是由于拥挤造成的同一树种内部的竞争. 因此，对每一个树种存在一点，在这一点树木由于拥挤会主动停止增长，且存在另一点，在这一点树木通过竞争阻止另一种树的增长. 两种树木能够共存的条件是每种树达到限制自己增长的点之前已经达到它限制另一种树增长的点. [132]

这一节的定常态分析留下一个重要的问题. 给定一个具有一个平衡态的动态系统，究竟是否能够到达平衡态？答案依赖于模型的动力学性质. 称一个平衡点

$$x_0 = (x_1^0, \cdots, x_n^0)$$

是渐近稳定的(或仅是稳定的)，条件是状态变量

$$(x_1(t), \cdots, x_n(t))$$

充分接近 x_0 时，它们被平衡点吸引. 即

$$(x_1(t), \cdots, x_n(t)) \to x_0.$$

定常态分析不能回答稳定性问题，所以我们不得不将这个问题的进一步讨论推迟到下一节.

4.2 动力系统

动力系统模型是最普遍应用的动态模型. 在一个动力系统模型中力的变化由微分方程刻画. 在这一节我们将集中考虑应用图示方法获得一个动力系统的定性性质. 重点是稳定性问题.

例 4.2 蓝鲸和长须鲸是两个生活在同一海域的相似的种群，因此认为它们之间存在竞争. 蓝鲸的内禀增长率每年估计为 5%，长须鲸为每年 8%. 环境承载力(环境能够支持的鲸鱼的最大数量)估计蓝鲸为 150 000 条，长须鲸为 400 000 条. 鲸鱼竞争的程度是未知的. 在过去的 100 年剧烈的捕捞已经使鲸鱼数量减少，蓝鲸大约 5 000 条，长须鲸大约 70 000 条. 蓝鲸是否会灭绝？ [133]

我们将应用五步方法. 注意到这个问题非常类似例 4.1. 第一步是提出问题. 我们将用蓝鲸和长须鲸的数量作为状态变量并且关于增长和竞争做最简单的假设. 开始的问题是：两个鲸鱼种群从它们现在的状态是否能变化到平衡态？第一步的结果总结在图 4-3.

第二步选择建模方式. 我们将这个问题构造成一个动力系统.

一个由 n 个状态变量(x_1, …, x_n)构成的动力系统是一个微分方程组

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1, \cdots, x_n) \\ \vdots \quad & \quad \vdots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(x_1, \cdots, x_n) \end{aligned} \tag{3}$$

变量：

B=蓝鲸的数量

F=长须鲸的数量

g_B=蓝鲸种群的增长率(每年)

g_F=长须鲸种群的增长率(每年)

c_B=与蓝鲸竞争的影响(每年鲸鱼数)

c_F=与长须鲸竞争的影响(每年鲸鱼数)

假设：

$g_B=0.05B(1-B/150\ 000)$

$g_F=0.08F(1-F/400\ 000)$

$c_B=c_F=\alpha BF$

$B\geqslant 0 \quad F\geqslant 0$

α 是正实数

目标：确定动力系统是否能够从 $B=5\ 000$，$F=70\ 000$ 开始达到稳定的平衡态

134

图 4-3　鲸鱼问题的第一步结果

定义在状态空间$(x_1, \cdots, x_n)\in S$上，其中 S 是$\mathbb{R}^n$的一个子集．微分方程解的存在性和惟一性理论表明，如果 $f_1, \cdots, f_n$ 在点

$$x_0=(x_1^0, \cdots, x_n^0),$$

的一个邻域内有连续的一阶偏导数，则这个微分方程组存在通过这个初值点的惟一解．详细内容参见任何一本微分方程课本(例如［Hirsch 和 Smale，1974］，p. 162)

最好将动力系统的一个解看作是状态空间的一条轨线．只要可微性假设成立就存在过每个点的轨线，除了平衡点外轨线不相交．设

$$x=(x_1, \cdots, x_n)$$
$$F(x)=(f_1(x), \cdots, f_n(x)).$$

则动力系统方程为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=F(x). \tag{4}$$

对每一条轨线 $x(t)$ 导数 $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$ 表示速度向量．因此，对每一条解曲线 $x(t)$，$F(x(t))$是在每点的速度向量．向量场 $F(x)$呈现了在整个状态空间中运动的方向和快慢．通常两个变量的动力系统的定性性质可以通过在选择的点处画向量场而获得．满足 $F(x)=0$ 的点是平衡点，我们将特别注意这些点附近的向量场．

第三步是构造模型的公式．令 $x_1=B$，$x_2=F$，记

$$x_1'=f_1(x_1, x_2)$$
$$x_2'=f_2(x_1, x_2),$$

其中

$$f_1(x_1,x_2) = 0.05x_1\left(1-\frac{x_1}{150\ 000}\right)-\alpha x_1 x_2$$
$$f_2(x_1,x_2) = 0.08x_2\left(1-\frac{x_2}{400\ 000}\right)-\alpha x_1 x_2. \tag{5}$$

状态空间是

135

$$S=\{(x_1,x_2):x_1\geqslant 0,x_2\geqslant 0\}.$$

第四步是解这个模型．我们要勾画出这个问题的一个向量场图．从勾画水平集 $f_1=0$ 和 $f_2=0$ 开始．平衡态将是这两个水平集的交集．进一步，向量场将垂直于 $f_1=0(x_1'=0)$且平行于 $f_2=0(x_2'=0)$．沿着这两条曲线画速度向量．然后在它们之间添上一些速度向量，记住向量的长度和方向是连续变化的(只要 $F(x)$ 连续，通常正是这样)．事实上，对速度向量长度的分析不是非常重要的．完整的曲线见图 4-4.

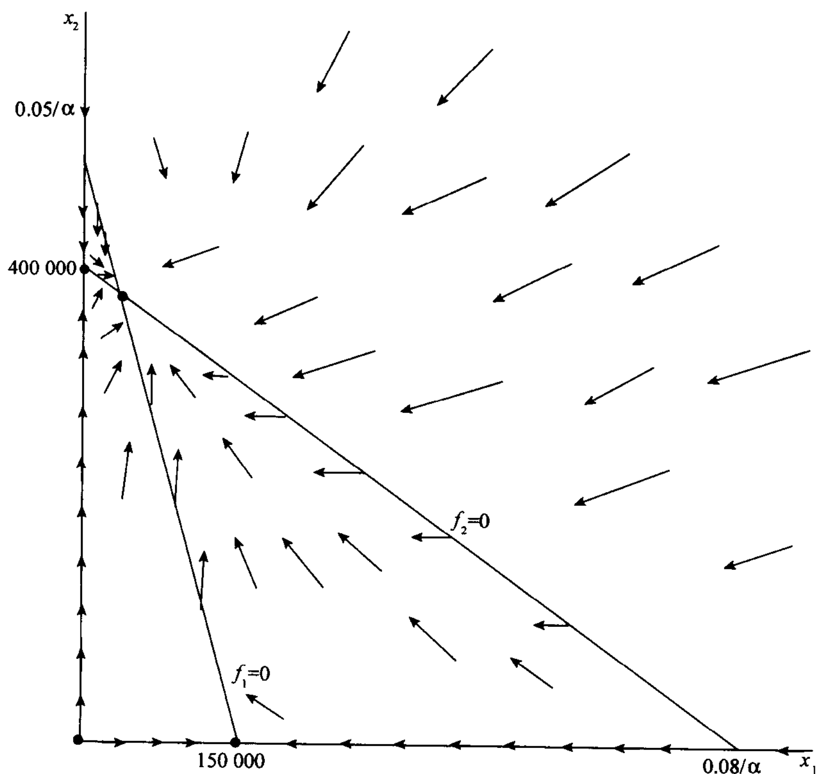


图 4-4　长须鲸 x_2 与蓝鲸 x_1 表示鲸问题的向量场

$f_1(x_1,\ x_2)=0.05x_1(1-x_1/150\ 000)-\alpha x_1 x_2$

$f_2(x_1,\ x_2)=0.08x_2(1-x_2/400\ 000)-\alpha x_1 x_2$

136

这里有四个平衡态解：三个在

$$
\begin{aligned}
&(0,0)\\
&(150\ 000,0)\\
&(0,400\ 000)
\end{aligned}
\tag{6}
$$

另一个点的坐标依赖于 α. 在我们的图示中假设

$$400\ 000 < \frac{0.05}{\alpha}.$$

此时很容易看出区域内部的平衡点是惟一稳定的平衡态. 事实上，过状态空间的任意一点的解将最终趋于这个平衡态. 特别是，当 $t\to\infty$ 时，具有初值 $x_1(0)=5\ 000$，$x_2(0)=70\ 000$ 的解将趋于这个平衡态.

第五步是用非数学的语言总结我们分析模型所得到的结果. 基于我们的分析，只要停止捕捞，鲸鱼种群将恢复到原来水平，生态系统将处于稳定的平衡态.

当然，我们的结论基于一些相当宽松的假设. 例如，我们假设竞争的影响相对较小. 如果它比较大[例如，$(0.05/\alpha)<400\ 000$]，则这两个种群将不可能共存. 假设竞争影响很小是有理由的，因为我们知道在我们开始捕捞之前这两个种群已经共存了很长的时间. 对种群增长过程我们也做了一些简单的假设. 最关键的是对非常小的种群，假设种群仍将按内禀增长率增长. 人们已知某些种群具有最小的群体水平(称为最小可生存种群水平)，低于这个量时种群的增长率为负值. 这个假设当然会改变我们动力系统的行为.

最后，我们研究灵敏性和稳健性. 首先我们考虑对参数 α 的灵敏性，对它我们知道得很少. 对任意的 $\alpha<1.25\times10^{-7}$ 存在一个稳定的平衡态 $x_1>0$，$x_2>0$，

137

$$
\begin{aligned}
x_1 &= \frac{150\ 000(8\ 000\ 000\alpha-1)}{D}\\
x_2 &= \frac{400\ 000(1\ 875\ 000\alpha-1)}{D},
\end{aligned}
\tag{7}
$$

其中

$$D = 15\ 000\ 000\ 000\ 000\alpha^2-1,$$

这由克拉默法则求得. 例如，如果 $\alpha=10^{-7}$，则

$$
\begin{aligned}
x_1 &= \frac{600\ 000}{17}\approx 35\ 294\\
x_2 &= \frac{6\ 500\ 000}{17}\approx 382\ 353.
\end{aligned}
\tag{8}
$$

在这一点的灵敏性为

$$S(x_1,\alpha) = \frac{21\ 882\ 352\ 927}{6\ 000\ 000\ 000}\approx -3.6$$

和

$$S(x_2,\alpha) = \frac{27}{221}\approx 0.122.$$

前面的计算可以用手算或用计算机代数系统计算. 图 4-5 显示了用计算代数系统 MAPLE 计算灵敏性$S(x_1, \alpha)$的结果.

```
> e1:=(5/100)*(1-x1/150000)-alpha*x2;
```

$$e1 := \frac{1}{20} - \frac{1}{3000000} x1 - \alpha x2$$

```
> e2:=(8/100)*(1-x2/400000)-alpha*x1;
```

$$e2 := \frac{2}{25} - \frac{1}{5000000} x2 - \alpha x1$$

```
> s:=solve({e1=0, e2=0}, {x1,x2});
```

$$s := \left\{ x1 = 150000 \frac{-1 + 8000000\,\alpha}{-1 + 15000000000000\,\alpha^2}, \quad x2 = 400000 \frac{-1 + 1875000\,\alpha}{-1 + 15000000000000\,\alpha^2} \right\}$$

```
> assign(s);
> dx1dalpha:=diff(x1,alpha);
```

$$dx1dalpha := \frac{1200000000000}{-1 + 15000000000000\,\alpha^2} - 4500000000000000000 \frac{(-1 + 8000000\,\alpha)\,\alpha}{(-1 + 15000000000000\,\alpha^2)^2}$$

```
> assign(alpha=10^(-7));
> sx1alpha:=dx1dalpha*(alpha/x1);
```

$$sx1alpha := \frac{-62}{17}$$

```
> evalf(sx1alpha);
```

-3.647058824

图 4-5 用计算代数系统 MAPLE 计算鲸鱼问题的灵敏性

蓝鲸种群对 α 更灵敏. 如果 $\alpha = 10^{-8}$, 则

$$x_1 = \frac{276\ 000\ 000}{1\ 997} \approx 138\ 207$$

$$x_2 = \frac{785\ 000\ 000}{1\ 997} \approx 393\ 090.$$

当然如图 4-4 所示总是有 $x_1 < 150\ 000$, $x_2 < 400\ 000$, 但是这个平衡态最重要的特征不是它的坐标, 而是它处于 $x_1 > 0$, $x_2 > 0$ 并且是稳定的. 我们认为这些结论对 $\alpha < 1.25 \times 10^{-7}$ 的整个区间是正确的. 因此, 应该说我们的主要结论对 α 一点儿也不灵敏. 同样的, 我们的主要结论对内禀增长率和环境承载量, 甚至对现存鲸鱼群体的状态也是一点儿也不灵敏.

更深入的稳健性问题考虑函数 f_1 和 f_2 的形式. 假设 x_1'/x_1 和 x_2'/x_2 分别是 x_1 和 x_2 线性函数. 这些直线表示了一个种群或另一个种群停止增长的点. 去掉这个线性的假设. 设

138
~
139

$$x_1' = x_1 g_1(x_1, x_2)$$
$$x_2' = x_2 g_2(x_1, x_2).$$

如果 g_1 和 g_2 是非线性的，只要向量场具有相同的一般特征，我们所有的分析结果仍然是对的，见图 4-6.

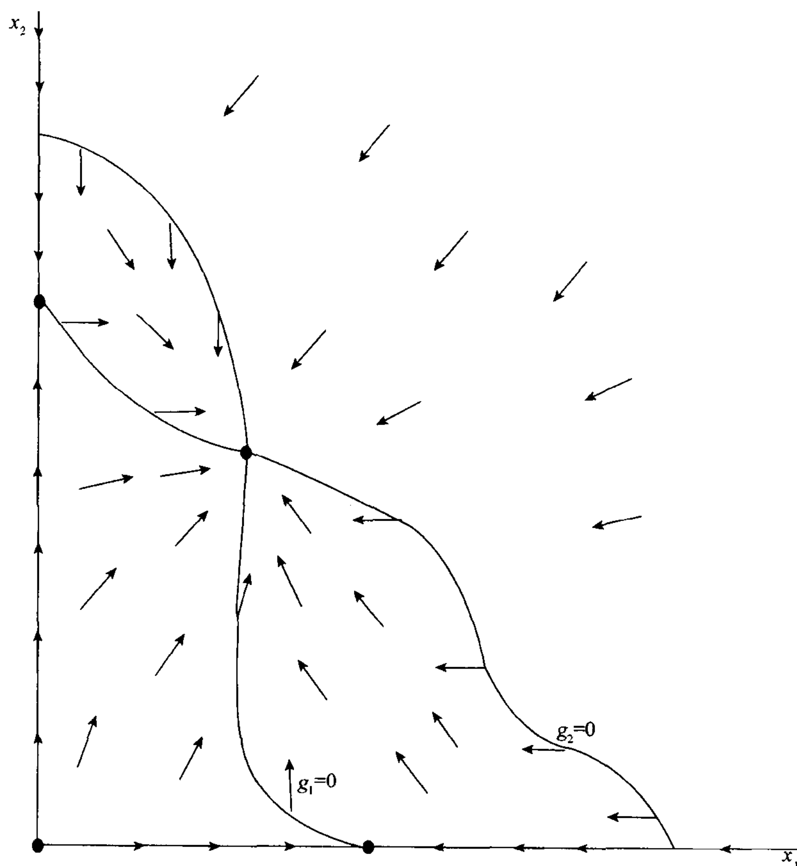


图 4-6 长须鲸 x_2 与蓝鲸 x_1 一般鲸鱼问题的向量场

$f_1(x_1, x_2)=x_1 g_1(x_1, x_2)$

$f_2(x_1, x_2)=x_2 g_2(x_1, x_2)$

[140]

4.3 离散时间的动力系统

对某些问题很自然取离散的时间变量，此时一般微分方程被它的离散时间的模式：差分方程代替. 离散的和连续的动力系统之间的关系是 $\Delta x/\Delta t$ 与 dx/dt 的关系，因此，不论我们假设时间是离散的还是连续的，动力系统的特性常常被认为是大致相同的. 但是，这种逻辑推断忽略了重要的一点. 每一个离散时间的动力系统都存在一种时间滞后，滞后的时间是时间步长 Δt 的长度. 对动力非常强的系统，时滞会导致出乎意料的结果.

例 4.3　宇航员在训练中要求用手动控制做对接演习．作为这个演习的一部分，要求保持一个正在运行的太空船与另一个正在运行的太空船的相对位置．手控制器提供了不同的加速度和减速度，并且在太空船上有一个装置测量这两个飞船的接近速度．建议使用如下的策略进行飞船对接．首先观察接近速度．如果为零，则不用再做任何事．否则，记住这个接近速度，再看加速度控制器，控制加速度使得它与接近速度相反，（即如果接近速度是正值，则放慢，如果是负的，则加快.）且正比于这个差值（即如果发现接近速度达到两倍时，我们将以两倍的速度刹车）．经过一段时间，再观察接近速度并重复上面步骤．在什么环境下这个策略是有效的？

我们将应用五步方法．设 v_n 表示在时间 t_n 观测到的接近速度，t_n 为第 n 次观测的时间．设

$$\Delta v_n = v_{n+1} - v_n$$

表示根据我们的调整得到的太空船接近速度的改变．记

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n.$$

为两次观测速度之间间隔的时间．时间区间自然被分成两部分：调整速度控制器的时间和处于调整与下一次速度观测之间的时间．记

$$\Delta t_n = c_n + w_n,$$

141

其中 c_n 是调节控制器的时间，w_n 是下一次观测之前的等待时间．参数 c_n 是宇航员响应时间的函数，w_n 可任意设定．

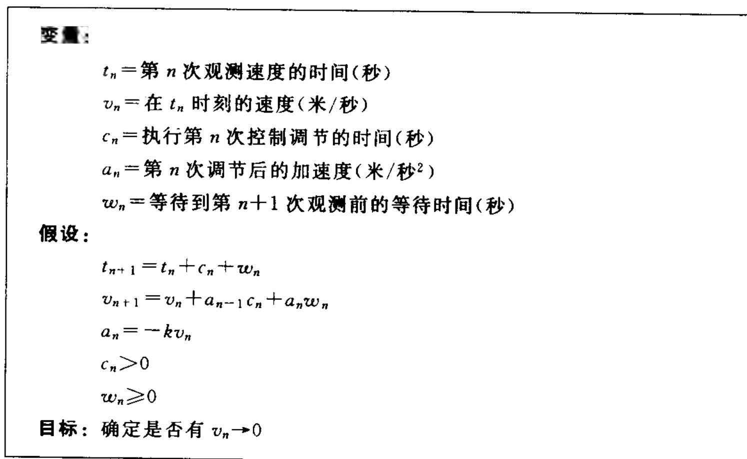
记 a_n 为第 n 次调节后设定的加速度，由初等的物理得到

$$\Delta v_n = a_{n-1} c_n + a_n w_n.$$

控制规律要求加速度正比于$(-v_n)$，因此

$$a_n = -kv_n.$$

第一步的结论总结在图 4-7.



变量：

t_n＝第 n 次观测速度的时间（秒）

v_n＝在 t_n 时刻的速度（米/秒）

c_n＝执行第 n 次控制调节的时间（秒）

a_n＝第 n 次调节后的加速度（米/秒^2）

w_n＝等待到第 $n+1$ 次观测前的等待时间（秒）

假设：

$t_{n+1} = t_n + c_n + w_n$

$v_{n+1} = v_n + a_{n-1} c_n + a_n w_n$

$a_n = -kv_n$

$c_n > 0$

$w_n \geqslant 0$

目标： 确定是否有 $v_n \to 0$

图 4-7　对接问题的第一步结果

第二步是选择建模的方式．我们将为这个问题组建一个离散时间的动力系统．

一个离散时间的动力系统由若干个定义在状态空间 $S\subseteq\mathbb{R}^n$ 的状态变量$(x_1,\cdots,x_n)$和差分方程组构成

142

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= f_1(x_1,\cdots,x_n)\\ \vdots\quad &\quad\ \vdots\\ \Delta x_n &= f_n(x_1,\cdots,x_n).\end{aligned}\tag{9}$$

其中 Δx_n 表示在一个时间步长内 x_n 的改变量．通常取时间步长为 1，这相当于选择适当的单位．如果时间步长的长度是变化的，或者这个动力系统随时间变化，则我们将时间也作为一个状态变量．如果设

$$\begin{aligned}x &= (x_1,\cdots,x_n)\\ F &= (f_1,\cdots,f_n),\end{aligned}$$

则运动方程可以形式地写成

$$\Delta x = F(x).$$

这个差分方程的解是状态空间中的一系列点．

$$x(0),x(1),x(2),\cdots$$

且对所有的 n 有

$$\begin{aligned}\Delta x(n) &= x(n+1)-x(n)\\ &= F(x(n))\end{aligned}$$

平衡态点 x_0 由

$$F(x_0)=0,$$

刻画，而且，只要 $x(0)$充分接近 x_0，如果

$$x(n)\to x_0$$

则平衡态是稳定的．

将一个解看作状态空间中的一系列点，向量 $F(x(n))$把点 $x(n)$连接到点 $x(n+1)$．向量场 $F(x)$的图可以反映出离散时间动力系统的行为．

例 4.4　设 $x=(x_1, x_2)$，考虑差分方程

143

$$\Delta x = -\lambda x,\tag{10}$$

其中 $\lambda>0$．在平衡态 $x_0=(0, 0)$附近的解有什么性质？图 4-8 呈现了当 $0<\lambda<1$ 时的向量场 $F(x)=-\lambda x$．显然 $x_0=(0, 0)$是稳定的平衡态．每一步都更接近 x_0．现在我们考虑当 λ 变大时将会发生的情况．当 λ 增大时，图 4-8 中的每个向量将伸长．当 $\lambda>1$ 时向量伸长超过平衡态．当 $\lambda>2$ 时向量伸长使得终点 $x(n+1)$实际上比起点 $x(n)$更远离平衡态$(0, 0)$．此时 x_0 是一个不稳定的平衡态．

这个简单的例子清楚地说明了这一事实：离散时间的动力系统的行为不总是像它们相应的连续时间的系统一样．微分方程

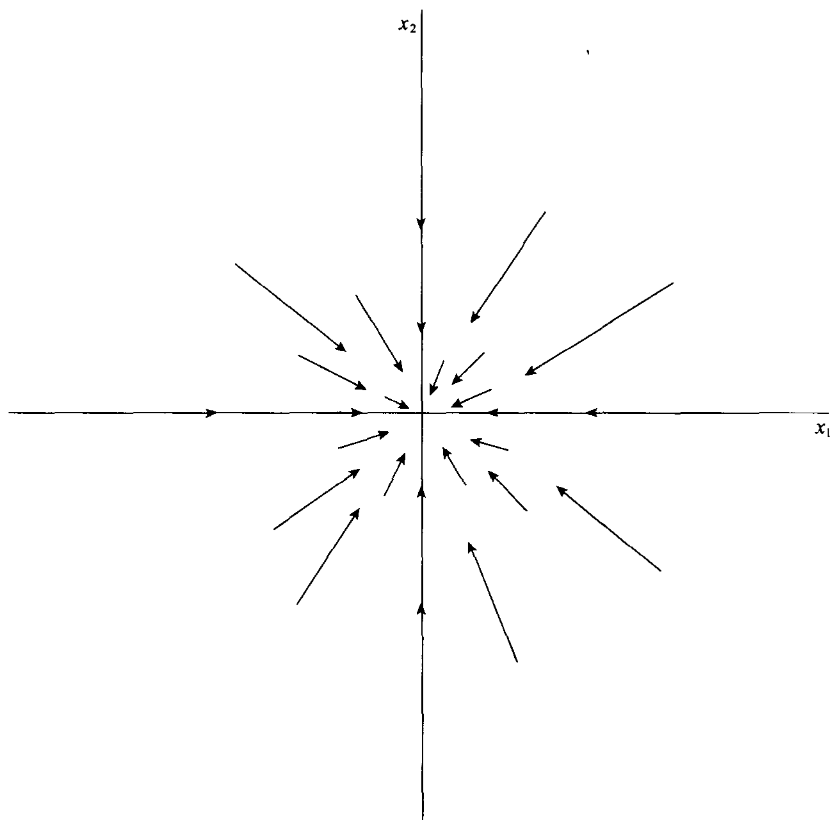


图 4-8 例 4.4 的向量场

$$f_1(x_1, x_2) = -\lambda x_1$$

$$f_2(x_1, x_2) = -\lambda x_2$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -\lambda x \tag{11}$$

的解具有形式

$$x(t) = x(0)\mathrm{e}^{-\lambda t},$$

[144]

并且当 $\lambda>0$ 时原点是一个稳定的平衡态. 类似的差分方程(10)的行为上的差别是由于内在的时滞. 近似式

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

仅对较小的 Δt 有效，所谓较小是相对 x 对 t 的灵敏性而言. 这个近似式仅当 Δx 表示对 x 的相对小的变化时才成立. 如果不是这样，离散的与连续的系统之间的差异可能是出乎意料的.

现在我们回头讨论例 4.3 的对接问题. 五步方法的第三步是模型的公式化. 我们将对接问题构造成一个离散时间的动力系统. 由图 4-7 我们得到

$$(v_{n+1}-v_n)=-kv_{n-1}c_n-kv_nw_n.$$

因此，第 n 步速度的变化依赖于 v_n 和 v_{n-1}. 为简化分析，对所有的 n 假设 $c_n=c$ 和 $w_n=w$. 则时间步长为

$$\Delta t=c+w$$

我们并不需要将时间作为状态变量. 但是，我们确实应该同时考虑 v_n 和 v_{n-1}. 设

$$x_1(n)=v_n$$
$$x_2(n)=v_{n-1}.$$

计算

$$\begin{aligned}\Delta x_1&=-kwx_1-kcx_2\\ \Delta x_2&=x_1-x_2.\end{aligned}\tag{12}$$

状态空间是 $(x_1, x_2)\in\mathbb{R}^2$.

第四步是求解模型. 存在一点平衡点(0, 0)位于两条直线的交点，

[145]

$$kwx_1+kcx_2=0$$
$$x_1-x_2=0.$$

通过令 $\Delta x_1=0$ 和 $\Delta x_2=0$ 得到稳定态方程. 图 4-9 给出了向量场的图.

$$F(x)=(-kwx_1-kcx_2, x_1-x_2).$$

似乎解将趋于平衡态，但这一点很难证明. 如果 k，c 和 w 很大，则平衡态可能不稳定，这点也同样难以证明.

在数学研究中我们经常遇到不能解决的问题. 通常在这种情形最好是重新审查我们的假设，并考虑是否能够通过进一步简化假设将问题简化到我们能够解决. 当然，除非简化的问题具有某些实际意义，否则简化的问题将变成一个毫无意义且平庸的练习.

在我们的对接问题中，我们已将速度的改变 Δv_n 表达成两部分的和. 一部分表示发生在读速度指示器与调节加速度控制器之间的速度改变. 假设这段时间很短. 实际上假设 c 比 w 小很多. 如果 v_n 和 v_{n-1} 差别不大，近似式

$$\Delta v_n\approx -kwv_n$$

应该成立. 差分方程

$$\Delta x_1=-kwx_1$$

类似于例 4.4 的差分式，对任意的 $kw<2$ 我们将得到一个稳定的平衡态. 如果 $kw<1$，我们将逼近这个平衡态，而不会越过它.

第五步是用通俗的语言分析问题. 也许我们只能说我们不知道答案. 但是，我们可以做得更好些. 我们可以这样汇报说，用初等的图方法无法获得令人完全满意的解. 换句话说，需要采用更巧妙的方法准确地确定在什么条件下设置的控制策略才起作用. 在两次控制之间的时间间隔不是太长，并且调节的幅度不是太大的多数情况下这个策略应该确实有效. 由于在看速度指示器与调节控制器之间

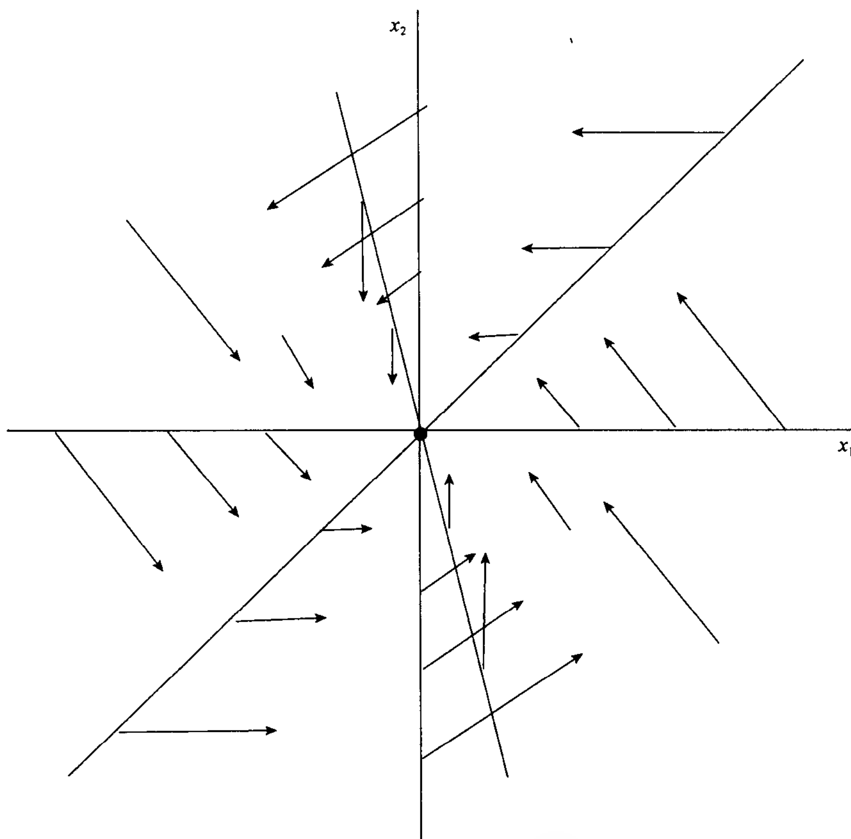


图 4-9　前期的速度 x_2 与当前的速度 x_1 所表示的对接问题的向量场

$f_1(x_1,\ x_2)=-kwx_1-kcx_2$

$f_2(x_1,\ x_2)=x_1-x_2$

有一个时间的滞后导致问题复杂. 因为在这个时间间隔实际的速度可能变化，同时我们正根据陈旧的和不准确的信息操作. 这样增加了我们计算的不确定因素. 如果我们忽略时间滞后的效应，(如果这个滞后很小则是可行的)，则我们可以得到如下一些一般的结论.

只要控制调节不是太剧烈，则控制策略将起作用. 进一步，两次调节之间间隔的时间越长，调节幅度必须越小. 而且，它们之间呈反比. 如果两次调节之间的间隔时间增加两倍，则调节幅度可以减半. 特别地，如果我们每 10 秒钟调节一次，则我们可以设置加速度控制在 1/10 的应设置的速度值，以免超过目标速度零. 为了容许人工和仪器的误差，我们应该设置控制值稍微低些——比如，速度的 1/15 或 1/20. 更频繁的调节需要对接近速度指示器更频繁的观测且更注意操作部分，但是确实可以实现在控制之下对更大推动力的成功管理. 这大概是有利的.

146～147

常规地我们以灵敏性分析结束对问题的讨论. 因为实际上我们还没有找到解决问题的方法，所以我们将这个讨论推迟到下一章.

4.4　习题

1. 重新考虑例 4.1 的树木问题. 假设

$$\frac{r_2}{a_2}<\frac{r_1}{b_1} \quad 及 \quad \frac{r_1}{a_1}<\frac{r_2}{b_2}$$

于是平衡态如图 4-2 所示.

(a)画这个模型的向量场.

(b)确定四个平衡态是稳定的还是不稳定的.

(c)两个树种能否共存于稳定的平衡态.

(d)假设经历一场砍伐后仅存几棵有价值的硬材树留在原地. 关于这两种树种的将来这个模型能预测些什么?

2. 重新考虑例 4.1 的树木问题. 现在假设

$$\frac{r_2}{a_2}<\frac{r_1}{b_1} \quad 及 \quad \frac{r_1}{a_1}\geqslant\frac{r_2}{b_2}.$$

(a)确定在状态空间内 $x_1\geqslant 0$，$x_2\geqslant 0$，每个平衡态的位置(x_1, x_2).

(b)画此时的向量场.

(c)确定每个平衡态是稳定的还是不稳定的.

(d)假设开始有同样数量的硬材树和软材树. 关于这两种树种的将来这个模型能预测些什么?

3. 重做习题 2，但现在假设

148

$$\frac{r_2}{a_2}\geqslant\frac{r_1}{b_1} \quad 及 \quad \frac{r_1}{a_1}<\frac{r_2}{b_2}.$$

4. 在例 4.2 鲸鱼问题中我们应用了一个种群增长的 Logistic 模型，没有种群间相互竞争的种群 P 的增长率为

$$g(P)=rP\left(1-\frac{P}{K}\right).$$

在这个问题中我们将采用较简单的增长模型

$$g(P)=rP.$$

(a)两种鲸鱼种群能否共存? 应用五步方法，建一个处于定常态的动力系统模型.

(b)画这个模型的向量场. 确定每个平衡态的位置.

(c)确定状态空间每个平衡态是否稳定.

(d)假设存在 5 000 条蓝鲸和 70 000 条长须鲸，关于这两种鲸鱼的将来这个模型能预测些什么?

5. 在例 4.2 鲸鱼问题中我们应用了一个种群增长的 Logistic 模型，没有种群间

相互竞争的种群 P 的增长率为

$$g(P)=rP\left(1-\frac{P}{K}\right).$$

在这个问题中我们将采用较复杂的增长模型

$$g(P)=\left(\frac{r}{c}\right)P(P-c)\left(1-\frac{P}{K}\right),$$

其中参数 c 表示种群水平的最小值，低于这个水平种群将出现负增长．假设 $\alpha=10^{-7}$ 且最小值的种群水平是蓝鲸 3 000 条，长须鲸 15 000 条．

(a)两种鲸鱼种群能否共存？应用五步方法，建一个处于定常态的动力系统模型．

(b) 勾画这个模型的向量场．确定每个平衡态是否稳定．

(c)假设存在 5 000 条蓝鲸和 70 000 条长须鲸，关于这两种鲸鱼的将来这个模型能预测些什么？

(d)假设我们低估了蓝鲸的最小有效种群值，这个值实际上接近 10 000．于是两个种群会发生什么变化？

6. 重新考虑例 4.2 鲸鱼问题，假设 $\alpha=10^{-8}$．在这个问题中考察捕捞对两种鲸鱼的影响．设捕捞努力量为 E 船/天，导致蓝鲸的年捕捞量 qEx_1 和长须鲸的年捕捞量 qEx_2，其中假设参数 q(捕捞能力)约为 10^{-5} [149]

(a)在什么条件下两种鲸鱼种群能在目前的捕捞状况下持续共存？应用五步方法，建一个处于定常态的动力系统模型．

(b)勾画这个模型的向量场，满足(a)的条件．

(c)求使得长须鲸种群减少到现在的约 70 000 条的最小捕捞量．假设在开始捕捞前有蓝鲸 150 000 条、长须鲸 400 000 条．

(d)如果继续按(c)给定的努力量捕捞这两个种群将发生什么变化？画出此时的向量场．这就是导致国际捕鲸协会(IWC)号召国际禁止捕鲸的原因．

7. 蓝鲸最喜欢的一种食物是所谓的磷虾．这些极小的虾状动物被大量地吞噬，为巨大的鲸鱼提供主要的食物来源．磷虾的最大饱和种群为 500 吨/英亩．当缺少捕食者，环境不拥挤时，磷虾种群以每年 25%的速率增长．磷虾 500 吨/英亩可以提高蓝鲸 2%的年增长率，同时 150 000 条蓝鲸将减少磷虾 10%的年增长率．

(a)确定鲸鱼与磷虾是否可以在平衡态共存．应用五步方法，建一个处于定常态的动力系统模型．

(b) 画出这个模型的向量场．确定每个平衡态是否稳定．

(c)描述两个种群随时间的变化．假设初始状态为蓝鲸 5 000 条、磷虾 750 吨/英亩．

(d)对(c)得到的结论如何敏感地依赖磷虾 25%的年增长率的假设？

8. 两军交战．红队具有 3 比 1 的数量优势，但蓝队训练有素且装备较好．分别

R 和 B 记为红队和蓝队力量的水平．战斗的 Lanchester 模型规定

$$R' = -aB - bRB$$
$$B' = -cR - dRB,$$

[150] 其中第一项考虑到直接战斗（指向特殊目标），第二项考虑区域战斗（例如炮兵）的贡献．假设蓝军比红军的武器的有效性高，即 $a>c$ 和 $b>d$．但是武器的有效性达到什么样的优势才足以抵消 3∶1 的人数优势？

(a)假设 $a=\lambda c$ 和 $b=\lambda d$，对某个 $\lambda>1$．确定 λ 的近似下界以使得蓝军获胜．应用五步方法，建立一个动力系统．

(b)在(a)部分假设红军具有 n∶1 的人员优势．讨论在(a)部分所得结果对参数 $n\in(2,5)$ 的灵敏性．

9. 下面这个简单的模型打算描述供求动态关系．设 P 表示一个商品的出售价，Q 表示这种商品的产量．供给曲线 $Q=f(P)$ 表明在给定价格时为取得最大利润应该生产的商品产量．需求曲线 $P=g(Q)$ 表明在给定生产量时，为取得商品的最大效用，应确定什么样的出售价．

(a)选择一个商品，对供给曲线 $Q=f(P)$ 和需求曲线 $P=g(Q)$ 的形状做出一个有根据的推测．

(b)运用(a)的结果确定 P 和 Q 的平衡点．

(c)假设 P 将趋向于由需求曲线确定的水平，而 Q 将趋向于由供给曲线确定的水平，基于这些假设建立一个动态模型．

(d)根据你的模型，平衡态是否稳定？采用离散时间或连续时间的模型是否有区别？（经济学家为了表现时间滞后的效应通常采用离散时间模型．）

(e)对在(a)中所采用的假设做一个灵敏性分析．考虑稳定性．

10. 一个拥有 100 000 成员的群体遭受一场很少致命的疾病，受害者将对这种疾病具有免疫力．仅当一个易感者直接与一个病人接触时才发生传染．传染周期约为三星期．上星期有 18 个新病例报告．这周有 40 个新病例．由于过去的感染，估计这个群体的 30%成员具有免疫力．

(a)最终被感染的病人数是多少？应用五步方法，并建立一个离散时间的动力系统．

(b) 估计每一周的最大的新发病人数．

(c)设计一个灵敏性分析研究在(a)中给出的假设，那些假设没有经实际数据检验．

(d)对上星期所报告的新病例数 18 做一个灵敏性分析．这是由于考虑到前几周的被漏报的传染病例．

[151]

11. 重新考虑例 4.3 对接问题，现在假设 $c=5$ 秒，$w=10$ 秒和 $k=0.02$．

(a)假设初始的接近速度为 50 米/秒，计算由模型预测的速度值 v_0，v_1，v_2，…．对接过程是否成功？

(b)计算(a)的解的一个简单易行的方法是利用具有性质 $x(n+1)=G(x(n))$ 的函数 $G(x)=x+F(x)$ 迭代. 求这个问题的迭代函数，并用它重新计算(a).

(c)从 $x(0)=(1, 0)$ 开始计算解 $x(1)$，$x(2)$，$x(3)$，…. 重复上面过程从 $x(0)=(0, 1)$ 开始. 当 $n\to\infty$ 时解将如何变化? 这是否意味着平衡态(0, 0)的稳定性? [提示：所有可能的初始状态 $x(0)=(a, b)$ 可以写成向量(1, 0)和(0, 1)的线性组合，而且 $G(x)$ 是 x 的线性函数.]

(d)是否存在满足 $G(x)=\lambda x$，λ 是一个实数的状态 x? 如果存在，以这个状态为初始状态，这个系统将发生什么变化?

4.5　进一步的阅读文献

Bailey, N. (1975). *The Mathematical Theory of Infectious Disease*, Hafner Press, New York.

Casstevens, T. *Population Dynamics of Governmental Bureaus*, UMAP module 494.

Clark, C. (1976). *Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources*, Wiley, New York.

Giordano, F. and Leja, S. *Competitive Hunter Models*, UMAP module 628.

Greenwell, R. *Whales and Krill: A Mathematical Model*, UMAP module 610.

Greenwell, R. and Ng, H. *The Ricker Salmon Model*, UMAP module 653.

Hirsch, M. and Smale, S. (1974). *Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra*, Academic Press, New York.

Horelick, B., Koont, S., and Gottleib, S. *Population Growth and the Logistic Curve*, UMAP module 68.

Horelick, B. and Koont, S. *Epidemics*, UMAP module 73.

Lanchester, F., Newman, James R., Ed. (1956). Mathematics in Warfare, *The World of Mathematics*, Vol. 4, pp. 1240–1253, Simon and Schuster, New York.

May, R. (1976). *Theoretical Ecology: Principles and Applications*, Saunders, Philadelphia.

Morrow, J. *The Lotka–Volterra Predator–Prey Model*, UMAP module 675.

Sherbert, D. *Difference Equations with Applications*, UMAP module 322.

Tuchinsky, P. *Management of a Buffalo Herd*, UMAP module 207.

152

第 5 章　动态模型分析

在这一章中我们考虑某些广泛应用于分析离散和连续时间动态系统的技巧．除一些特殊情况外，这些方法并没有导出精确解析解．精确的解析方法更适合在微分方程课程中讨论．无论如何，对实际中提出的绝大多数动态系统模型用任何已知的技巧都不可能导出精确解．在这一章，我们将展示能够被应用于分析绝大多数动态模型的方法．即使在精确的解析解不可能获得的情况下，这些方法仍可以提供关于动态系统性质的重要的定性信息．

5.1　特征值方法

当一个动态模型的方程是线性的时，我们可以获得精确的解析解．尽管在实际生活中线性动态系统几乎不存在，但多数动态系统至少在局部上可以被线性系统逼近．这样的线性逼近，特别是在一个孤立平衡点的邻域内，为许多最重要的适合于动态建模的分析技巧提供了基础．

例 5.1　再次考虑例题 4.1 的树木问题．假设硬材树每年增长率为 10%，软材树每年增长率为 25%．一英亩林地可以提供大约 10 000 吨的硬木或 6 000 吨的软木．竞争的程度还未从数值上确定．两种类型的树能否共存于一个稳定的平衡态？

153　五步方法的第一步被列在图 4-1．对这个特定的情况我们得到

$$r_1 = 0.10$$

$$r_2 = 0.25$$

$$a_1 = \frac{0.10}{10\ 000}$$

$$a_2 = \frac{0.25}{6\ 000}.$$

第二步选择建模的方式，包含分析的方法．我们将通过特征值方法分析这个非线性动态系统．

假设我们有一个动态系统 $x'=F(x)$，其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$是状态空间 $S\subseteq\mathbb{R}^n$ 的一个元素，而且 $F=(f_1, \cdots, f_n)$．一个点 $x_0\in S$ 是一个平衡态或稳定态当且仅当 $F(x_0)=0$．已有定理表明如果矩阵

$$A = \begin{pmatrix} \partial f_1/\partial x_1(x_0) \cdots \partial f_1/\partial x_n(x_0) \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \\ \partial f_n/\partial x_1(x_0) \cdots \partial f_n/\partial x_n(x_0) \end{pmatrix} \tag{1}$$

的特征值全都具有负实部，则平衡点是渐近稳定的．如果有一个特征值具有正实部，则这个平衡点是不稳定的．对其他情况（纯虚特征值）这种检验是不确定的（参考[Hirsch 和 Smale，1974]，p. 187）．

特征值方法基于线性逼近．尽管 $x'=F(x)$是非线性的．在平衡点的邻域内

我们将有

$$F(x) \approx A(x - x_0)$$

除了现在 F 的导数由一个矩阵表示外，这与在单变量微积分中你所看到的线性逼近是同样的. 有些作者称矩阵 DF 为单变量导数的类推. 线性逼近可以使得当原点是 $x'=Ax$ 的稳定的平衡态时(即，x_0 是 $x'=A(x-x_0)$的稳定的平衡态)，x_0 同样也是 $x'=F(x)$的稳定的平衡态. 因此只要了解线性系统情形的特征值检验即可. 154

毫无疑问，在微分方程的入门课程中你曾经解过某些线性微分方程，并且你可能也知道解与特征值之间的关系. 例如，如果 $Au=\lambda u$(即 u 是 A 的属于特征值 λ 的特征向量)，则 $x(t)=ue^{\lambda t}$是初值问题

$$x' = Ax, \quad x(0) = u.$$

的一个解. 事实上可以写出 $n\times n$ 线性微分方程组的通解，虽然这样做相当复杂并且需要大量的线性代数知识. 但是，这样做的好处是可以对解的性质有个一般的描述. 这个定理说明微分方程 $x'=Ax$ 的任意解 $x(t)$的每个分量都是形如

$$t^k e^{at}\cos(bt), \quad t^k e^{at}\sin(bt)$$

的函数的线性组合，其中 $a\pm ib$ 是 A 的特征值(如果特征值是实的，则 $b=0$)，并且 k 是一个小于 n 的非负整数. 从这个一般性的描述容易得到，原点是方程组 $x'=Ax$ 的渐近稳定的平衡态当且仅当每一个特征值 $a\pm ib$ 都有 $a<0$(参考[Hirsch 和 Smale，1974]，p. 135).

当然特征值方法的成功应用要求我们能够求得出特征值. 对简单的情况(例如，在$\mathbb{R}^2$ 上)可以用手算出特征值，或者借助于计算机代数系统. 否则我们将不得不依赖逼近的方法. 幸运的是有计算 $n\times n$ 矩阵特征值的数值分析软件包，它对大多数情况都非常有效(例如，Press(1986)).

回到例 5.1，由 4.1 节可知，在点

$$x_1 = \frac{r_1a_2 - r_2b_1}{D}$$

$$x_2 = \frac{a_1r_2 - b_2r_1}{D}$$

有一个平衡态，其中

$$D = (a_1a_2 - b_1b_2).$$

155

我们已经确定了 a_1，a_2，r_1 和 r_2 的值，但没有给定 b_1 和 b_2 的值. 我们仍假设 $b_i<a_i$. 此时取 $b_i=a_i/2$. 则平衡点的坐标是 $x_0=(x_1^0, x_2^0)$，其中

$$x_1^0 = \frac{28\ 000}{3} \approx 9\ 333$$

$$x_2^0 = \frac{4\ 000}{3} \approx 1\ 333. \tag{2}$$

动态系统方程是 $x'=F(x)$，其中 $F=(f_1, f_2)$且

$$f_1(x_1,x_2) = 0.10x_1 - \frac{0.10}{10\ 000}x_1^2 - \frac{0.05}{10\ 000}x_1x_2$$

$$f_2(x_1,x_2) = 0.25x_2 - \frac{0.25}{6\,000}x_2^2 - \frac{0.125}{6\,000}x_1x_2. \tag{3}$$

偏导数是

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_1}{\partial x_1} &= \frac{20\,000 - x_2}{200\,000} - \frac{x_1}{50\,000} \\
\frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= \frac{-x_1}{200\,000} \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{-x_2}{48\,000} \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{-x_1}{48\,000} - \frac{x_2}{12\,000} + \frac{1}{4}.
\end{aligned} \tag{4}$$

计算偏导数(4)在平衡态点(2)的值，且将其代回(1)式，我们得到

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-7}{75} & \frac{-7}{150} \\ \frac{-1}{36} & \frac{-1}{18} \end{pmatrix}. \tag{5}$$

[156] 这个 2×2 矩阵的特征值是方程

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{7}{75} & \frac{7}{150} \\ \frac{1}{36} & \lambda + \frac{1}{18} \end{vmatrix} = 0.$$

的根. 计算行列式我们得到方程

$$\frac{1\,800\lambda^2 + 268\lambda + 7}{1\,800} = 0,$$

从而得到

$$\lambda = \frac{-67 \pm \sqrt{1\,339}}{900}.$$

因为两个特征值都具有负实部，所以这个平衡态是稳定的.

对连续时间动态系统的特征值检验需要少许的计算. 这是计算机代数系统的一个恰当的应用. 图 5-1 解释了运用计算机代数系统 MATHEMATICA 对这个问题执行的第四步计算.

最后我们进行第五步. 我们已经发现硬材树与软材树可以共存于一个平衡态. 在一个成熟的、稳定的树林中每英亩大约有 9 300 吨硬木树和 1 300 吨软木树. 这个结论基于对两类树种之间竞争程度的近似合理的假设. 灵敏性分析的推导将确定这些假设对我们初步结论的影响.

为做灵敏性分析，我们仍假设 $b_i = ta_i$，且将放松假设 $t=1/2$. 条件

$$b_i < a_i$$

$$\left(\frac{r_i}{a_i}\right) < \left(\frac{r_j}{b_j}\right)$$

隐含着 $0<t<0.6$. 平衡点的坐标$(x_1^0,\ x_2^0)$是

$$
\begin{aligned}
x_1^0 &= \left(\frac{10\ 000 - 6\ 000t}{(1-t^2)}\right) \\
x_2^0 &= \left(\frac{6\ 000 - 10\ 000t}{(1-t^2)}\right).
\end{aligned}
\tag{6}
$$

```
In[1]: f1 = x1/10 - (x1^2/10)/10000 - (5 x1 x2/100)/10000
```

Out[1] $-\frac{x1^2}{100000}-\frac{x2\,x1}{200000}+\frac{x1}{10}$

```
In[2]: f2 = 25 x2/100 - (25 x2^2/100)/6000 - (125 x1 x2/1000)/6000
```

Out[2] $-\frac{x2^2}{24000}-\frac{x1\,x2}{48000}+\frac{x2}{4}$

```
In[3]: s = Solve[{f1/x1 == 0, f2/x2 == 0}, {x1, x2}]
```

Out[3] $\left\{\left\{x1\to\frac{28000}{3},\ x2\to\frac{4000}{3}\right\}\right\}$

```
In[4]: f = {f1, f2}
```

Out[4] $\left\{-\frac{x1^2}{100000}-\frac{x2\,x1}{200000}+\frac{x1}{10},\ -\frac{x2^2}{24000}-\frac{x1\,x2}{48000}+\frac{x2}{4}\right\}$

```
In[5]: df = {D[f, x1], D[f, x2]}
```

Out[5] $\begin{pmatrix} -\frac{x1}{50000}-\frac{x2}{200000}+\frac{1}{10} & -\frac{x2}{48000} \\ -\frac{x1}{200000} & -\frac{x1}{48000}-\frac{x2}{12000}+\frac{1}{4} \end{pmatrix}$

```
In[6]: df/.s
```

Out[6] $\left(\left\{-\frac{7}{75},-\frac{1}{36}\right\}\left\{-\frac{7}{150},-\frac{1}{18}\right\}\right)$

```
In[7]: Eigenvalues[{{-7/75, -1/36}, {-7/150, -1/18}}]
```

Out[7] $\left\{\frac{1}{900}(-67-\sqrt{1339}),\ \frac{1}{900}(-67+\sqrt{1339})\right\}$

图 5-1　运用计算机代数系统 MATHEMATICA 对树木问题第四步的计算

157
~
158

这个系统的微分方程是 $x_i' = f_i(x_1, x_2)$，其中

$$
\begin{aligned}
f_1(x_1,x_2) &= 0.10x_1 - \frac{0.10x_1^2}{10\ 000} - \frac{0.10tx_1x_2}{10\ 000} \\
f_2(x_1,x_2) &= 0.25x_2 - \frac{0.25x_2^2}{6\ 000} - \frac{0.25tx_1x_2}{6\ 000}.
\end{aligned}
\tag{7}
$$

且偏导数是

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial f_1}{\partial x_1} &= \frac{10\ 000 - tx_2}{100\ 000} - \frac{x_1}{50\ 000} \\
\frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= \frac{-tx_1}{100\ 000} \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{-tx_2}{24\ 000} \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{-tx_1}{24\ 000} - \frac{x_2}{12\ 000} + \frac{1}{4}.
\end{aligned}
\tag{8}
$$

计算在平衡点(6)的偏导数值(8)并将其代回(1)式得到

$$
A = \begin{pmatrix} \frac{5-3t}{50(t^2-1)} & \frac{t(5-3t)}{50(t^2-1)} \\ \frac{t(3-5t)}{12(t^2-1)} & \frac{3-5t}{12(t^2-1)} \end{pmatrix}. \tag{9}
$$

为找特征值我们必须求解的特征方程是

$$\left[\lambda-\frac{5-3t}{50(t^2-1)}\right]\left[\lambda-\frac{3-5t}{12(t^2-1)}\right]-\left[\frac{t(3-5t)}{12(t^2-1)}\right]\left[\frac{t(5-3t)}{50(t^2-1)}\right]=0. \quad (10)$$

解方程(10)得到 λ 的两个根

$$\lambda_1=\frac{143t-105+\sqrt{9\,000t^4-20\,400t^3+20\,449t^2-9\,630t+2\,025}}{600(1-t^2)}$$

$$\lambda_2=\frac{143t-105-\sqrt{9\,000t^4-20\,400t^3+20\,449t^2-9\,630t+2\,025}}{600(1-t^2)}. \quad (11)$$

159

图 5-2 说明如何运用计算机代数系统 MAPLE 计算这个问题的特征值. 当计算很复杂，并且全部用手算会增加犯错误的风险时，这类问题计算机代数系统特别有效. 大多数计算机代数系统带有图形工具. 图与代数的结合对现在的这类问题是重要的. 画一个图经常是解不等式的最容易的方法.

```
> with(linalg):
> f1:=x1/10-(x1^2/10)/10000-(t*x1*x2/10)/10000;
```

$$f1:=\frac{1}{10}x1-\frac{1}{100000}x1^2-\frac{1}{100000}t\,x1\,x2$$

```
> f2:=25*x2/100-(25*x2^2/100)/6000-(25*t*x1*x2/100)/6000;
```

$$f2:=\frac{1}{4}x2-\frac{1}{24000}x2^2-\frac{1}{24000}t\,x1\,x2$$

```
> df1dx1:=diff(f1,x1);
```

$$df1dx1:=\frac{1}{10}-\frac{1}{50000}x1-\frac{1}{100000}t\,x2$$

```
> df1dx2:=diff(f1,x2);
```

$$df1dx2:=-\frac{1}{100000}t\,x1$$

```
> df2dx1:=diff(f2,x1);
```

$$df2dx1:=-\frac{1}{24000}t\,x2$$

```
> df2dx2:=diff(f2,x2);
```

$$df2dx2:=\frac{1}{4}-\frac{1}{12000}x2-\frac{1}{24000}t\,x1$$

```
> s:=solve({f1/x1=0,f2/x2=0},{x1,x2});
```

$$s:=\left\{x2=2000\frac{-3+5t}{-1+t^2},\ x1=2000\frac{-5+3t}{-1+t^2}\right\}$$

```
> assign(s);
> A:=array([[df1dx1,df1dx2],[df2dx1,df2dx2]]);
```

$$A:=\begin{bmatrix}\frac{1}{10}-\frac{1}{25}\frac{-5+3t}{-1+t^2}-\frac{1}{50}\frac{t(-3+5t)}{-1+t^2} & -\frac{1}{50}\frac{t(-5+3t)}{-1+t^2}\\ -\frac{1}{12}\frac{t(-3+5t)}{-1+t^2} & \frac{1}{4}-\frac{1}{6}\frac{-3+5t}{-1+t^2}-\frac{1}{12}\frac{t(-5+3t)}{-1+t^2}\end{bmatrix}$$

```
> eigenvals(A);
```

$$\frac{1}{2}\frac{-286t+210+2\sqrt{20449t^2-9630t+2025-20400t^3+9000t^4}}{600t^2-600}$$

$$\frac{1}{2}\frac{-286t+210-2\sqrt{20449t^2-9630t+2025-20400t^3+9000t^4}}{600t^2-600}$$

图 5-2 运用计算机代数系统 MAPLE 对树木问题作灵敏性分析计算

图 5-3 显示了 λ_1 和 λ_2 随 t 在区间 $0<t<0.6$ 上的变化. 从这个图我们可以看到，λ_1 和 λ_2 总是负的，因此不论竞争程度如何，平衡态总是稳定的.（如果你做第 4 章的练习 1，从图的分析你大概会得出相同的结论.）

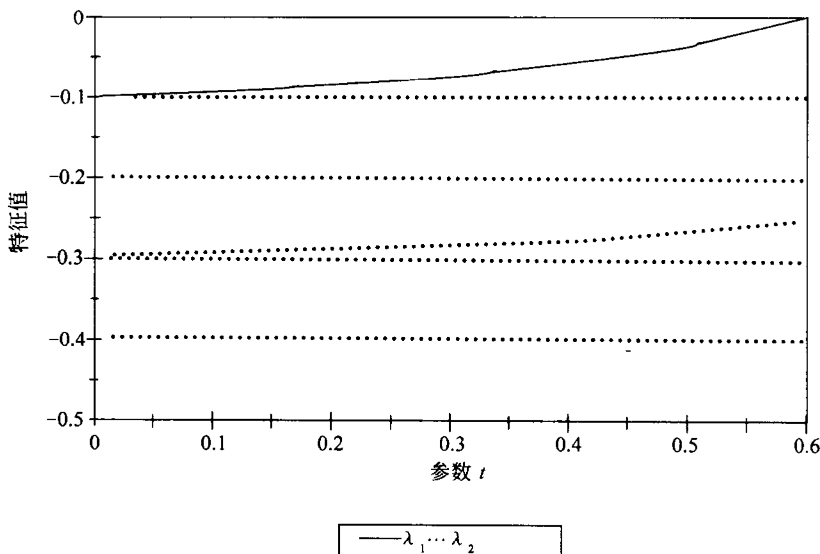


图 5-3　在树木问题中特征值 λ_1 和 λ_2 依赖于参数 t 的变化的图

$$\lambda_1=\frac{143t-105+\sqrt{9\,000t^4-20\,400t^3+20\,449t^2-9\,630t+2\,025}}{600(1-t^2)}$$

$$\lambda_2=\frac{143t-105-\sqrt{9\,000t^4-20\,400t^3+20\,449t^2-9\,630t+2\,025}}{600(1-t^2)}$$

5.2　对离散系统的特征值方法

前一节的方法仅适用于连续时间的动态系统. 在这一节中我们将对离散时间的动力系统的稳定性分析展示类似的方法. 我们分析的基础仍是线性逼近，结合特征值的计算.

例 5.2　重新考虑例题 4.3 的对接问题. 现在假设需要 5 分钟进行控制调节和外加 10 分钟从其他工作再次转向观测速度指示器. 在这些条件下，我们的调整速度的策略将会成功吗?

五步方法的第一步总结在图 4-7 中. 现在我们假设 $c_n=5$，$w_n=10$. 此时令 $k=0.02$；后面我们将进行对 k 的灵敏性分析.

第二步是选择建模的方法，包括求解方法. 我们将运用特征值方法.

给定一个离散时间的动力系统，

$$\Delta x = F(x)$$

其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$和 $F=(f_1, \cdots, f_n)$，我们定义一个迭代函数，

$$G(x)=x+F(x).$$

序列 $x(0)$，$x(1)$，$x(2)$，…是该差分方程组的解，当且仅当对所有的 n 有

$$x(n+1)=G(x(n))$$

160～162 一个平衡点 x_0 由它是函数 $G(x)$的不动点这一事实刻画，即 $G(x_0)=x_0$.

已有定理说明一个平衡点 x_0 是(渐近)稳定的如果偏导数矩阵

$$A=\begin{pmatrix} \partial g_1/\partial x_1(x_0) & \cdots & \partial g_1/\partial x_n(x_0) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial g_n/\partial x_1(x_0) & \cdots & \partial g_n/\partial x_n(x_0) \end{pmatrix} \tag{12}$$

的每一个特征值的绝对值小于 1. 如果特征值是复数 $a\pm ib$，我们提到的复数的绝对值是$(a^2+b^2)^{1/2}$. 对稳定性的这种简单检验类似于展示在前一小节对连续时间动力系统的特征值检验(参见[Hirsch 和 Smale，1974]，p. 280).

与连续情况一样，对离散时间动态系统的特征值检验也基于线性逼近. 尽管迭代函数 $G(x)$是非线性的，在平衡点 x_0 的邻域内，我们有

$$G(x)\approx A(x-x_0)$$

换句话说迭代函数 G 在平衡点 x_0 的邻域内的性质近似于线性函数 Ax 在原点附近的性质. 因此原来非线性系统在平衡点 x_0 的邻域内的性质近似于线性离散时间动力系统，它由迭代函数

$$x(n+1)=Ax(n)$$

在原点邻域内确定. 这个线性逼近保证了如果原点是线性系统的稳定的平衡态，则 x_0 是原非线性系统的稳定的平衡态. 因此只需要讨论线性系统的稳定性条件.

一个矩阵被称为一个线性压缩，如果对每个 x 有 $A^nx\to 0$. 已有定理表明如果矩阵 A 的每个特征值的绝对值小于 1，则 A 是一个线性压缩(参见[Hirsch 和 Smale，1974]，p. 279). 因此，当 A 的所有特征值的绝对值小于 1 时，原点是由 A 迭代生成的离散时间动力系统的稳定的平衡态. 我们用一个简单的情况解释这个结果的证明. 假设对所有的 x 有 $Ax=\lambda x$，则 λ 是 A 的一个特征值，且每个非零向量 x 是属于 λ 的特征向量. 对这种简单情况我们总有

$$x(n+1)=Ax(n)=\lambda x(n)$$

163 于是原点是稳定的平衡态当且仅当 $|\lambda|<1$.

现在我们回到对接问题. 第三步是列出这个模型使得在第二步确定的方法可以被运用. 此时我们已有一个以 $x_0=(0, 0)$为平衡态的线性系统. 迭代函数是

$$G(x_1,x_2)=x+F(x_1,x_2)=(g_1,g_2)$$

其中

$$g_1(x_1,x_2)=0.8x_1-0.1x_2$$
$$g_2(x_1,x_2)=x_1.$$

继续第四步，我们计算

$$\begin{vmatrix} \lambda - 0.8 & 0.1 \\ -1 & \lambda - 0 \end{vmatrix} = 0$$

或 $\lambda^2 - 0.8\lambda + 0.1 = 0$，由此我们获得

$$\lambda = \frac{4 \pm \sqrt{6}}{10}.$$

这是 $n=2$ 个不同的特征值，两者都是实数且位于 -1 和 $+1$ 之间．因此这个平衡态 $x_0=0$ 是稳定的，对任意的初值我们将得到 $x(t) \to (0, 0)$．

第五步是用通俗的语言叙述我们的结果．我们假设控制调整的时间间隔为 15 秒钟：5 秒钟调整和 10 秒钟松弛．运用一个 1∶50 的修正因子，我们可以保证我们控制比例方法成功．实际上，1∶50 的修正因子是指如果速度指示器读数为 50 米/秒我们将设加速度控制为 -1 米/秒^2．如果读数是 25 米/秒，我们设控制为 -0.5 米/秒^2，等等．

下面是对参数 k 的灵敏性分析．对一般的 k 给定的迭代函数为 $G=(g_1, g_2)$ 其中

$$g_1(x_1, x_2) = (1 - 10k)x_1 - 5kx_2$$
$$g_2(x_1, x_2) = x_1$$

由此导出特征方程

$$\lambda^2 - (1 - 10k)\lambda + 5k = 0.$$

164

特征值为

$$\lambda_1 = \frac{(1 - 10k) + \sqrt{(1 - 10k)^2 - 20k}}{2}$$
$$\lambda_2 = \frac{(1 - 10k) - \sqrt{(1 - 10k)^2 - 20k}}{2}. \quad (13)$$

在(13)式中根号下的量在

$$k_1 = \frac{4 - \sqrt{12}}{20} \approx 0.027$$

和

$$k_2 = \frac{4 + \sqrt{12}}{20} \approx 0.373.$$

之间取负值．图 5-4 显示了 λ_1 和 λ_2 在区间 $0 < k \leqslant k_1$ 上的图形．从这个图中可以看出这两个特征值的绝对值小于 1．因此在这整个区间上平衡态(0，0)是稳定的．当 $k_1 < k < k_2$ 时两个特征值都是复数，稳定性条件为

$$\left[\frac{(1 - 10k)^2}{4}\right] + \left[\frac{20k - (1 - 10k)^2}{4}\right] < 1 \quad (14)$$

由此导出 $k < 1/5$．图 5-5 显示了 λ_1 和 λ_2 对应于 $k \geqslant k_2$ 的图形．显然对所有的 k 较小的特征值 λ_2 具有大于 1 的绝对值．总之，只要 $k < 0.2$ 或者至少有一个 1∶5 的修正因子，这个方法就能够成功地调节速度．当然能知道 k 取什么值是最有效的也是有意义的．我们将这个问题留做练习．

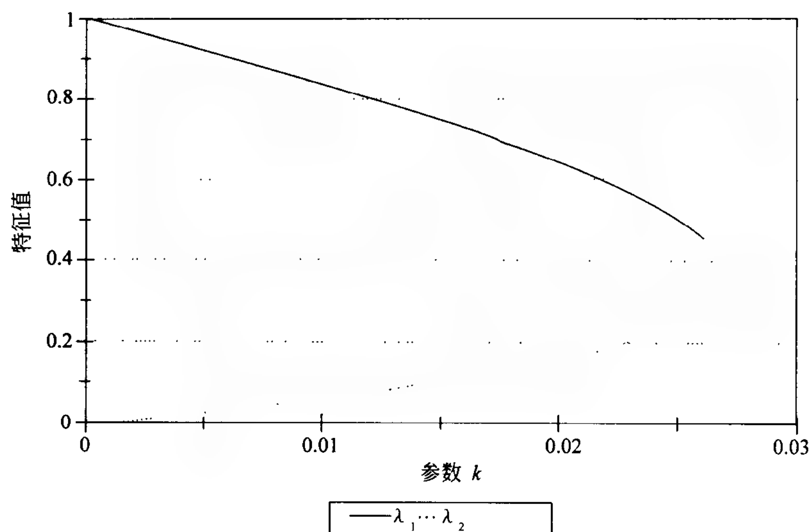


图 5-4　在对接问题中特征值 λ_1 和 λ_2 对应于控制参数 k 变化的图：$0<k\leqslant k_1$ 情形

$$\lambda_1=\frac{(1-10k)+\sqrt{(1-10k)^2-20k}}{2}$$

$$\lambda_2=\frac{(1-10k)-\sqrt{(1-10k)^2-20k}}{2}$$

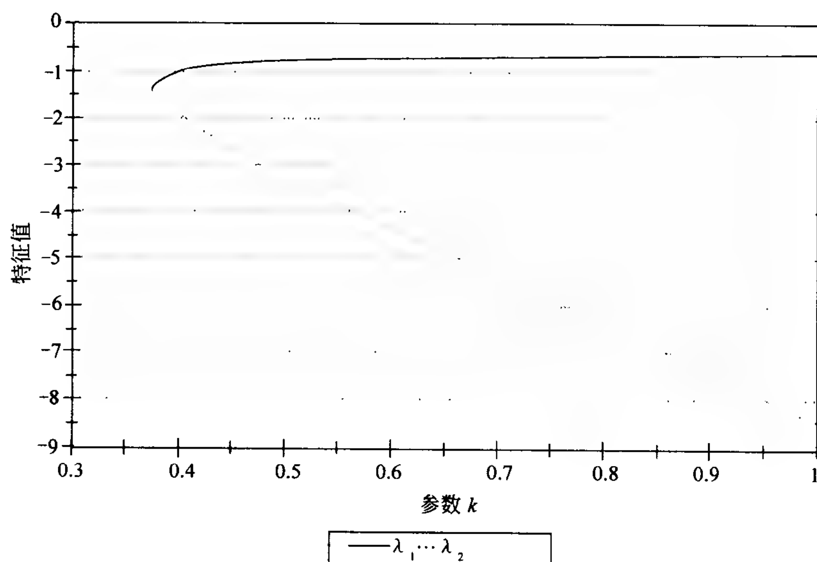


图 5-5　在对接问题中特征值 λ_1 和 λ_2 对应于控制参数 k 变化的图：$k\geqslant k_2$ 情形

$$\lambda_1=\frac{(1-10k)+\sqrt{(1-10k)^2-20k}}{2}$$

$$\lambda_2=\frac{(1-10k)-\sqrt{(1-10k)^2-20k}}{2}$$

5.3 相图

在5.1节我们引入了特征值检验考察连续时间动态系统的稳定性．这个检验基于在一个孤立的平衡点的邻域内的线性逼近的想法．本节我们将说明这个简单的想法如何用于获得一幅描述动态系统在平衡点附近的性质的图像．然后该信息与向量场的勾画一起运用，从而获得在整个状态空间上动态行为的图形描述，称此图为相图．相图在非线性动态系统分析中是重要的，因为在多数情况下不可能获得精确的解析解．在这一节的结尾我们将对离散时间动态系统类似技巧给出简短讨论，这些技巧同样是基于线性逼近的想法．

例5.3 考虑图5-6中的电路图．电路由一个电容，一个电阻和一个电感器构成一个简单闭路．电路中每个元件的作用由在这个回路中的电流和电压之间的关系表示．一个理想的物理模型给出这个关系

$$C\frac{\mathrm{d}v_C}{\mathrm{d}t}=i_C(\text{电容})$$

$$v_R=f(i_R)(\text{电阻})$$

$$L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=v_L(\text{电感})$$

165~167

其中 v_C 表示电容上的电压，i_R 表示经过电阻的电流，等等．称函数 $f(x)$ 为电阻的 v-i 特征．在古典的RLC电路理论中我们假设 $f(x)=Rx$，其中 R 表示电阻．基尔霍夫电流律说明进入一个节点的电流之和等于流出电流之和．基尔霍夫电压律说明闭路上所有电压差之和为零．对情形 $L=1$，$C=1/3$ 和 $f(x)=x^3+4x$ 确定这个电路随时间变化的行为．

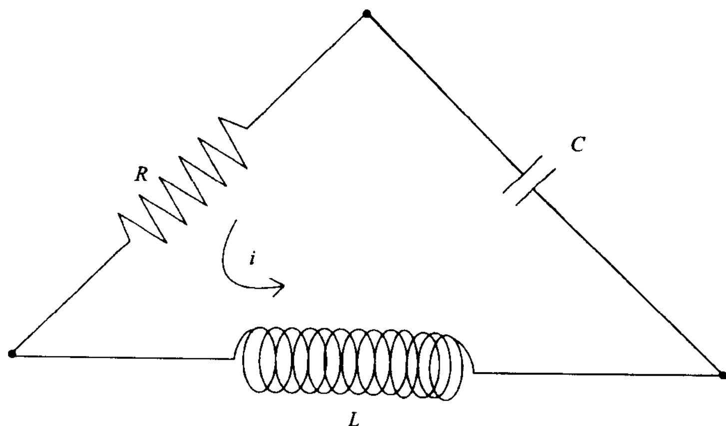


图5-6 例题5.3的RLC电路图

我们将应用五步方法．第一步的结果总结在图5-7中．第二步选择建模方法．我们将运用连续时间动态系统为此问题建模，并对其通过勾画完整的相图进行分析．

设我们有一个动态系统 $x'=F(x)$ 其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$ 且 F 在平衡点 x_0 的邻域内有一阶连续导数. 设 A 是一阶偏导数矩阵在平衡点 x_0 的值就像(1)式所定义的那样. 前面我们已经提到, 当 x 在 x_0 附近时系统 $x'=F(x)$ 的行为与线性系统 $x'=A(x-x_0)$ 相似. 现在我们将更具体地说明.

168

变量:

v_C = 电容上的电压

i_C = 过电容的电流

v_R = 电阻上的电压

i_R = 过电阻的电流

v_L = 电感器上的电压

i_L = 过电感器的电流

假设:

$C dv_C/dt = i_C$

$v_R = f(i_R)$

$L di_L/dt = v_L$

$i_C = i_R = i_L$

$v_C + v_R + v_L = 0$

$L = 1$

$C = 1/3$

$f(x) = x^3 + 4x$

目标: 确定六个变量随时间变化的性质

图 5-7 RLC 电路问题的第一步

一个连续时间动态系统的相图就是一个呈现了代表性地选择的解曲线的状态空间草图. 对线性系统不难画出其相图(至少在 $\mathbb{R}^2$ 上), 因为对线性微分方程组我们总能得到其解的表达式. 因此我们只需要对几个初始条件画出解曲线, 从而得到相图. 我们建议读者参考任何一本微分方程的教科书以详细了解如何求解线性微分方程. 对非线性系统我们可以应用线性逼近的方法在孤立的平衡点邻域内画出一个近似的相图.

同胚是一个具有连续逆映射的连续函数. 同胚的概念必须与形状及其一般性质联系起来理解. 例如考虑平面内的一个圆. 这个圆在同胚映射

169

$$G: \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2$$

下的像可以是另一个圆, 或椭圆, 或甚至是一个方形或一个三角形. 但它不会是一条线段. 那会破坏连续性. 它也不会是一个形如数字 8 的图像, 因为那样会破坏 G 有逆映射的性质(它必须是一一对应的). 已有定理说明如果 A 的特征值的实部都不为零, 则存在一个同胚 G, 它把系统 $x'=Ax$ 的相图映射为 $x'=F(x)$ 的相图, 使得 $G(0)=x_0$(参见[Hirsch 和 Smale, 1974], p. 314). 这个定理指出, 除了某些扭曲外, $x'=F(x)$ 在 x_0 附近的相图看起来像线性系统的相图. 就好像

我们在一张橡皮的纸上画线性系统的相图，我们可以任意地拉伸，但不能扯破. 这是一个非常强的结果. 它意味着，仅通过分析线性逼近，我们可以得到一个非线性动态系统在孤立的平衡态附近的行为的真实的图像，(适于几乎所有的实际目的). 为了完成在状态空间其他部分的相图，我们要将已经知道的关于解在平衡态附近的性质与向量场草图所包含的信息结合起来.

第三步是构造模型. 从考虑状态空间开始. 开始有 6 个状态变量，我们可以利用基尔霍夫定律将自由度的数目(独立状态变量的个数)从六个减到两个. 设 $x_1=i_R$，注意到同样有 $x_1=i_L=i_C$. 设 $x_2=v_C$ 则我们得到

$$
\begin{aligned}
\frac{x_2'}{3} &= x_1 \\
v_R &= x_1^3 + 4x_1 \\
x_1' &= v_L \\
x_2 + v_R + v_L &= 0.
\end{aligned}
$$

代入得到

$$
\begin{aligned}
&\frac{x_2'}{3} = x_1 \\
&x_2 + x_1^3 + 4x_1 + x_1' = 0,
\end{aligned}
$$

重新排列得到

170

$$
\begin{aligned}
x_1' &= -x_1^3 \quad 4x_1 - x_2 \\
x_2' &= 3x_1.
\end{aligned}
\tag{15}
$$

现在如果我们设 $x=(x_1, x_2)$，则(15)式可以写成形式 $x'=F(x)$，其中 $F=(f_1, f_2)$且

$$
\begin{aligned}
f_1(x_1, x_2) &= -x_1^3 - 4x_1 - x_2 \\
f_2(x_1, x_2) &= 3x_1.
\end{aligned}
\tag{16}
$$

第三步完成.

第四步是求解此模型. 我们将通过勾画完整的相图分析动态系统(15). 图 5-8 显示了这个动态系统的向量场的 MAPLE 图. 手画这个向量场也是相当简单的. 速度向量在曲线 $x=x_1$ 上是水平的，这里 $x_2'=0$，而在曲线 $x_2=-x_1^3-4x_1$ 上是垂直的，这里 $x_1'=0$. 在两条曲线的交点(0, 0)是平衡点. 由向量场难以断定这个平衡点是否稳定. 为了获得更多的信息，我们将分析在平衡点(0, 0)附近，性质接近(15)的线性系统.

根据(16)式求偏导数，我们得到

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial f_1}{\partial x_1} &= -3x_1^2 - 4 \\
\frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= -1 \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= 3 \\
\frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= 0.
\end{aligned}
\tag{17}
$$

计算偏导数(17)在平衡点(0，0)的值，并将其代回(1)式，我们得到

171

$$A=\begin{pmatrix}-4 & -1\\ 3 & 0\end{pmatrix}.$$

这个 2×2 矩阵的特征值是方程

$$\begin{vmatrix}\lambda+4 & 1\\ -3 & \lambda\end{vmatrix}=0.$$

的根．计算行列式，我们得到方程

$$\lambda^2+4\lambda+3=0,$$

于是有

172

$$\lambda=-3,-1.$$

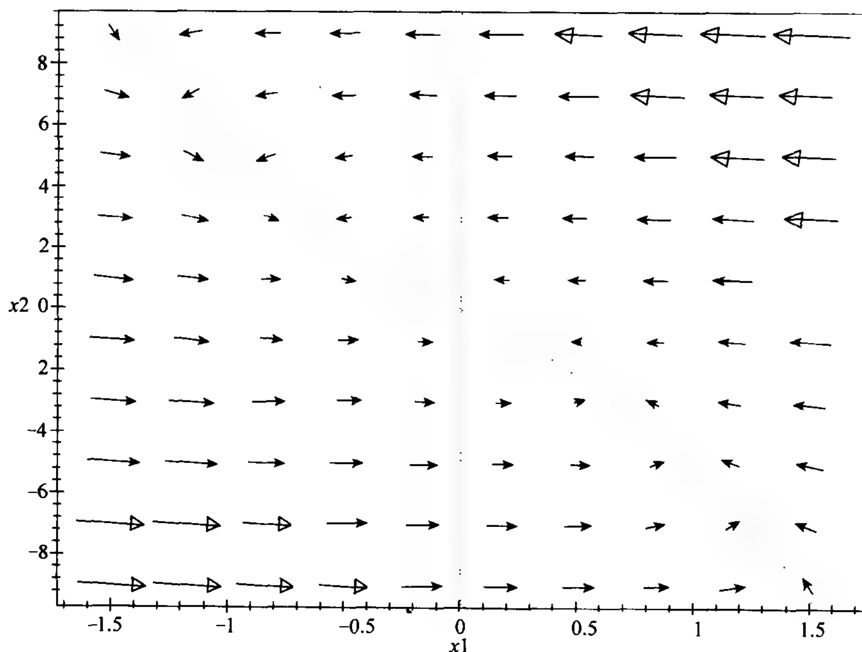


图 5-8　电压 x_2 关于电流 x_1 变化的图显示了例 5.3RLC 电路问题的向量场

$f_1(x_1,\ x_2)=-x_1^3-4x_1-x_2$

$f_2(x_1,\ x_2)=3x_1$

因为两个特征值都是负的，所以平衡态是稳定的．

为获得更多的信息我们将解线性系统 $x'=Ax$．此时有

$$\begin{pmatrix}x_1'\\ x_2'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-4 & -1\\ 3 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}. \tag{18}$$

利用特征值和特征向量解此方程．我们已经求得特征值 $\lambda=-3,\ -1$．为了求相应于特征值 λ 的特征向量我们必须求方程

$$\begin{pmatrix}\lambda+4 & 1\\ -3 & \lambda\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ 0\end{pmatrix}.$$

的非零解．对 $\lambda=-3$ 我们有

$$\begin{pmatrix}1 & 1\\ -3 & -3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ 0\end{pmatrix}$$

由此得

$$\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1\\ 1\end{pmatrix},$$

于是

$$\begin{pmatrix}-1\\ 1\end{pmatrix}e^{-3t}$$

是线性系统(18)的一个解．对 $\lambda=-1$ 我们有

$$\begin{pmatrix}3 & 1\\ -3 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ 0\end{pmatrix}$$

由此得

$$\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1\\ 3\end{pmatrix},$$

于是

173

$$\begin{pmatrix}-1\\ 3\end{pmatrix}e^{-t}$$

是线性系统(18)的另一个解．则(18)的一般解可以写成

$$\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}=c_1\begin{pmatrix}-1\\ 1\end{pmatrix}e^{-3t}+c_2\begin{pmatrix}-1\\ 3\end{pmatrix}e^{-t} \tag{19}$$

其中 c_1 和 c_2 是任意实常数．图 5-9 显示了线性系统(18)的相图．这个图通过对选择的几对常数值 c_1，c_2 画解曲线(19)而获得．例如，当 $c_1=1$ 和 $c_2=1$ 时，画出

$$x_1(t)=-e^{-3t}-e^{-t}$$
$$x_2(t)=e^{-3t}+3e^{-t}.$$

的图．我们还附加上一个线性向量场的图以便确定解曲线的方向．画一个相图时必须用箭头标明流的方向．

图 5-10 给出了原非线性动态系统(15)的完整的相图．这个图的获得是通过综合图 5-8 和 5-9 的信息，并且利用了非线性系统(15)的相图与线性系统(18)的相图同胚的事实．在这个例子中线性的和非线性的系统之间没有太多本质上的差异．

第五步是回答问题．问题是描述 RLC 电路的行为．全体的性质可以用两个量描述：通过电阻的电流和电容上的电压降．不论电路的初始状态如何，这两个

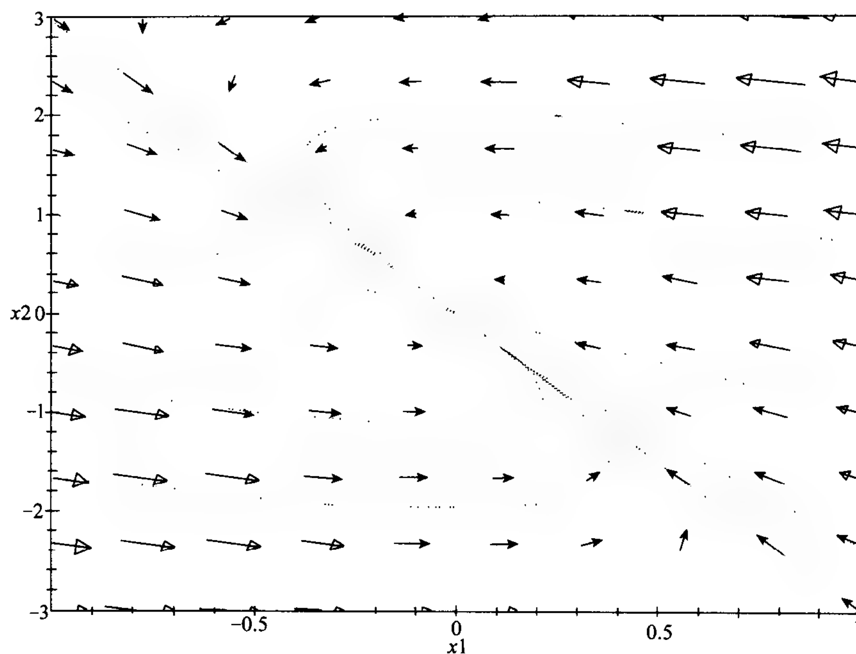


图 5-9　电压 x_2 关于电流 x_1 变化的图显示了对例 5.3RLC 电路问题在(0，0)附近的相图的线性逼近

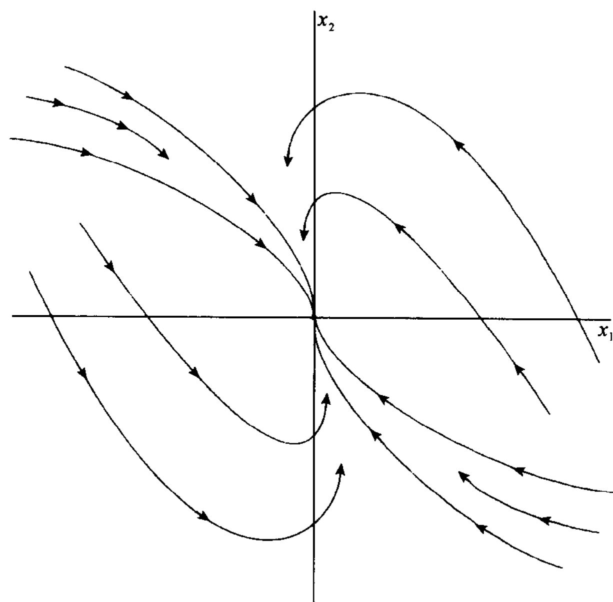


图 5-10　电压 x_2 关于电流 x_1 变化的图显示了例 5.3RLC 电路问题的完整相图

174～175

量最终将趋于零. 进一步，最终或者电压是正的且电流是负的，或者反之. 电流和电压随时间变化的完整的描述见图 5-10，其中 x_1 表示电流，x_2 表示电压. 其他感兴趣的变量的性质可以由这两个变量表示.（图 5-7 给出了详细的关系.）例如，x_1 实际上表示了这个回路上每个分支通过的电流.

下一步我们将进行灵敏性分析，以便确定我们假设中的微小变化对我们的结论的影响. 首先考虑电容 C. 在例子中我们假设 $C=1/3$. 现在通过让 C 未定来推广我们的模型. 此时取代(15)式，我们得到动态系统

$$\begin{aligned} x_1' &= -x_1^3-4x_1-x_2 \\ x_2' &= \frac{x_1}{C} \end{aligned} \tag{20}$$

现在有

$$\begin{aligned} f_1(x_1,x_2) &= -x_1^3-4x_1-x_2 \\ f_2(x_1,x_2) &= \frac{x_1}{C}. \end{aligned} \tag{21}$$

对 1/3 附近的 C 值，(21)式的向量场基本与图 5-8 相同. 速度向量在曲线 $x_1=0$ 上仍处于水平态，在曲线 $x_2=-x_1^3-4x_1$ 上仍处于垂直态. 在两条曲线交叉处仍存在一个平衡点(0，0).

求(21)的偏导数，得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} &= -3x_1^2-4 \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= -1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{1}{C} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= 0. \end{aligned} \tag{22}$$

176

计算(22)在平衡点(0，0)的偏导数值，并将其代回(1)，我们得到

$$A=\begin{pmatrix} -4 & -1 \\ 1/C & 0 \end{pmatrix}.$$

这个矩阵的特征值是方程

$$\begin{vmatrix} \lambda+4 & 1 \\ -1/C & \lambda \end{vmatrix}=0.$$

的根. 计算这个行列式，我们得到方程

$$\lambda^2+4\lambda+\frac{1}{C}=0.$$

特征值是

$$\lambda=-2\pm\sqrt{4-\frac{1}{C}}.$$

如果 $C>1/4$，则我们有两个不同的，都具有负实部的特征值，因此平衡态是稳定的. 此时线性系统的通解为

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = c_1 \begin{pmatrix} -1 \\ 2+\alpha \end{pmatrix} e^{(\ 2+\alpha)t} + c_2 \begin{pmatrix} -1 \\ 2-\alpha \end{pmatrix} e^{(\ 2-\alpha)t} \tag{23}$$

其中 $\alpha^2=4-1/C$. 这个线性系统的相图与图 5-9 近似，只是解直线的斜率随 C 变化. 当 C 的值大于 1/4 时，原来非线性系统的相图非常接近图 5-10. 总之，只要 $C>1/4$，我们关于 RLC 电路的一般结论对 C 的精确值不敏感. 对于电感 L 也有类似的结论. 一般地说，我们的解的重要特征(即特征向量)连续地依赖这些参数.

177

下一步我们考虑稳健性. 我们已经假设 RLC 电路具有 v-i 特征 $f(x)=x^3+4x$. 更一般地假设 $f(0)=0$ 且 f 是严格增加的. 现在的动态系统方程是

$$\begin{aligned} x_1' &= -f(x_1)-x_2 \\ x_2' &= 3x_1. \end{aligned} \tag{24}$$

此时有

$$\begin{aligned} f_1(x_1,x_2) &= -f(x_1)-x_2 \\ f_2(x_1,x_2) &= 3x_1. \end{aligned} \tag{25}$$

设 $R=f'(0)$. 线性逼近应用

$$A=\begin{pmatrix} -R & -1 \\ 3 & 0 \end{pmatrix}$$

因此特征值是方程

$$\begin{vmatrix} \lambda+R & 1 \\ 3 & \lambda \end{vmatrix}=0$$

的根. 计算得

$$\lambda=\frac{-R\pm\sqrt{R^2-12}}{2}.$$

只要 $R>\sqrt{12}$我们就有两个不同的实特征值，这个线性系统的行为就如图 5-9 描述的一样. 而且原来非线性系统的行为不可能与图 5-10 的差别太大. 我们已得到结论：RLC 电路关于我们对 v-i 特征形式的假设具有稳健性.

例 5.4　考虑非线性 RLC 电路，$L=1$，$C=1$ 且 v-i 特征 $f(x)=x^3-x$. 确定这个电路随时间变化的行为.

178

建模的过程当然与前面的例子相同. 令 $x_1=i_R$ 和 $x_2=v_C$，我们得到动态系统

$$\begin{aligned} x_1' &= x_1-x_1^3-x_2 \\ x_2' &= x_1. \end{aligned} \tag{26}$$

这个向量场的图参见图 5-11. 速度向量在曲线 $x_2=x_1-x_1^3$ 上是垂直的且在 x_2 轴上是水平的. 惟一的平衡点是原点(0，0). 从向量场难以断定原点是否是一个稳定的平衡态.

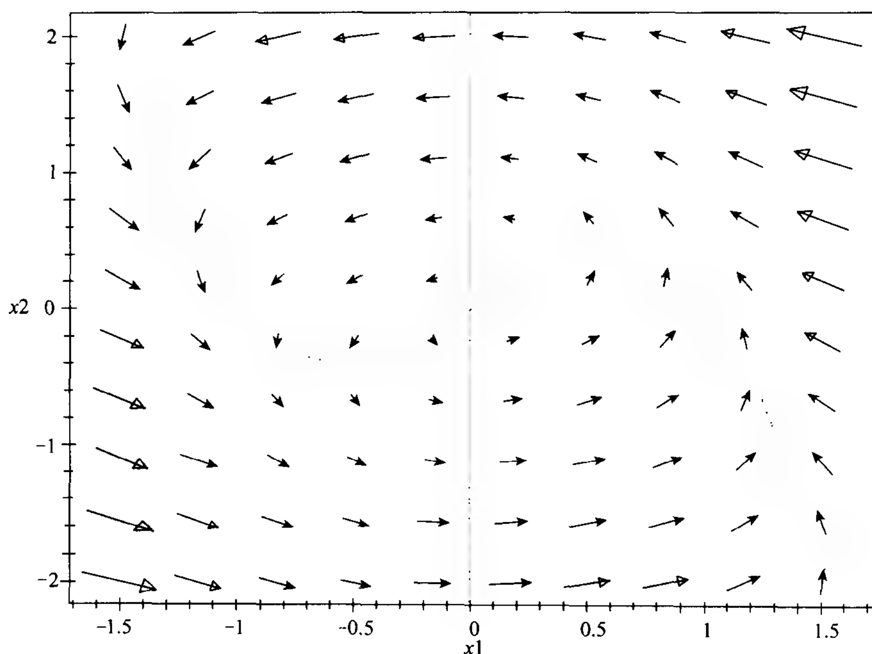


图 5-11　电压 x_2 关于电流 x_1 变化的图显示了例题 5.4 的 RLC 电路问题的向量场

$f_1(x_1,\ x_2)=x_1-x_1^3-x_2$

$f_2(x_1,\ x_2)=x_1$

179

偏导数矩阵是

$$A=\begin{pmatrix}1-3x_1^2 & -1\\ 1 & 0\end{pmatrix}.$$

计算在点 $x_1=0$，$x_2=0$ 处的值，得线性系统

$$\begin{pmatrix}x_1'\\ x_2'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & -1\\ 1 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}$$

它逼近非线性系统在原点附近的特性. 为求特征值我们必须求解

$$\begin{vmatrix}\lambda-1 & 1\\ -1 & \lambda-0\end{vmatrix}=0$$

或者 $\lambda^2-\lambda+1=0$. 特征值为

$$\lambda=1/2\pm\frac{i\sqrt{3}}{2}.$$

因为特征值的实部是正的，原点是不稳定的平衡态.

为了获得更多的信息，我们将求解这个线性系统. 为了寻找属于特征值

$$\lambda = \frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2}$$

的特征向量，求解

$$\begin{bmatrix} -1/2 + i\sqrt{3}/2 & 1 \\ -1 & 1/2 + i\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

得到

$$x_1 = 2, \quad x_2 = 1 - i\sqrt{3}.$$

180 于是我们求得复数解

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 - i\sqrt{3} \end{bmatrix} e^{(1/2 + i\sqrt{3}/2)t}.$$

取实部和虚部得到两个线性无关的实值解 $u=(x_1, x_2)$，其中

$$x_1(t) = 2e^{t/2}\cos\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$x_2(t) = e^{t/2}\cos\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right) + \sqrt{3}e^{t/2}\sin\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right)$$

且 $v=(x_1, x_2)$其中

$$x_1(t) = 2e^{t/2}\sin\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$x_2(t) = e^{t/2}\sin\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right) - \sqrt{3}e^{t/2}\cos\left(\frac{t\sqrt{3}}{2}\right).$$

通解为 $c_1u(t)+c_2v(t)$. 这个线性问题的相图显示在图 5-12. 这幅图画出了相应于几个选择不同的参数值 c_1 和 c_2 的解. 我们附上向量场的图以显示流的方向. 注意到，如果放大或缩小这个线性相图中的原点邻域，它们看起来基本上是相同的. 线性向量场和线性相图定义的特征之一就是在任何尺度下它们看起来相同. 非线性系统在原点邻域的相图看似大致相同，具有些变形. 在原点附近的解曲线逆时针方向向外旋转. 如果对非线性系统继续放大原点邻域的向量场或相图，它们看起来会越来越像线性系统. 但在远离原点处非线性系统的行为可能与线性系统的明显不同.

为了获得非线性系统的完整的相图，我们需要综合从图 5-11 和图 5-12 得到的信息. 图 5-11 中的向量场表明解曲线的行为在远离原点时发生巨大的变化. 仍然存在逆时针方向的流，但是解曲线不再像线性相图那样旋转地趋向无穷远. 从远离原点开始的解曲线看起来在继续它们的逆时针旋转同时朝着原点方向移动. 因为在原点附近的解曲线是旋转向外的，远离原点的解是趋向内部的，并且我们知道解曲线不相交，在相图上一定会发生某种有趣的情况. 无论发生什么，这一定是从未发生在线性系统的情况. 在线性相图中如果一条解曲线向外旋转，

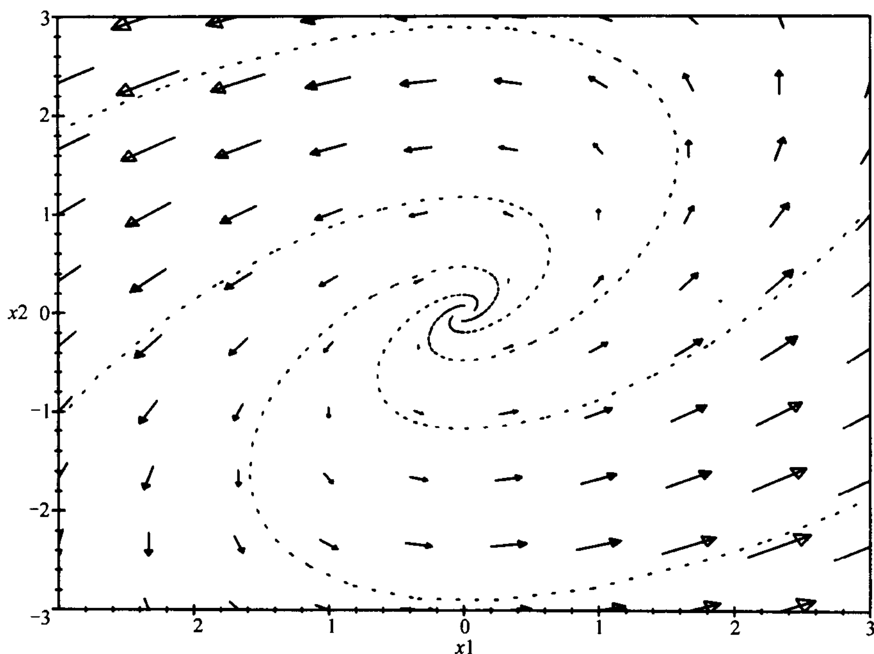


图 5-12 电压 x_2 关于电流 x_1 变化的图显示了对例题 5.4 的 RLC 电路问题在(0, 0)附近的相图的线性逼近

[181]

则它一定会一直向外旋转到无穷远. 在 6.3 节中我们将运用计算方法探讨动态系统(26). 直到那时候我们再给出完整的相图.

在结束线性逼近方法的讨论前，我们应该指出关于离散时间动态系统的几个要点. 假设我们有离散时间的动态系统

$$\Delta x = F(x)$$

其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$，且记

$$G(x) = x + F(x)$$

为迭代函数. 在平衡点 x_0 有 $G(x_0)=x_0$. 在 5.2 节对 x_0 附近的 x 我们采用逼近式

[182]

$$G(x) \approx A(x - x_0)$$

其中 A 是由(12)定义的在 $x=x_0$ 处的偏导数矩阵，就像(12)所定义的那样.

获得迭代函数 $G(x)$ 的图像的方法之一是画出像集

$$G(S) = \{G(x) : \in S\}$$

针对不同的集合

$$S = \{x : | x - x_0 | = r\}.$$

在维数 $n=2$ 时集合 S 是个圆，在维数 $n=3$ 时集合 S 是个球. 可以证明只要 A 是非奇异的，就存在一个微分同胚 $H(x)$，在 x_0 的邻域内映 $A(S)$ 到 $G(S)$上. 如果一个点 x 位于 S 的内部，则 $G(x)$将位于 $G(S)$的内部. 于是，对动态变化有

一个图形解释．图 5-13 到图 5-15 解释了例题 5.2 对接问题的动态过程．当 183 $G(S)=A(S)$时，G 为线性的．从集合 S 上(或内部)一个状态开始，如图 5-13 所示，下一个状态将在集合 $A(S)$上(或内部，相应地)如图 5-14 所示，接着再下一个状态将在集合 $A^2(S)=A(A(S))$上(或内部，相应地)如图 5-15 所示．当 $n\to\infty$时，集合 $A^n(S)$逐渐地收缩到原点．

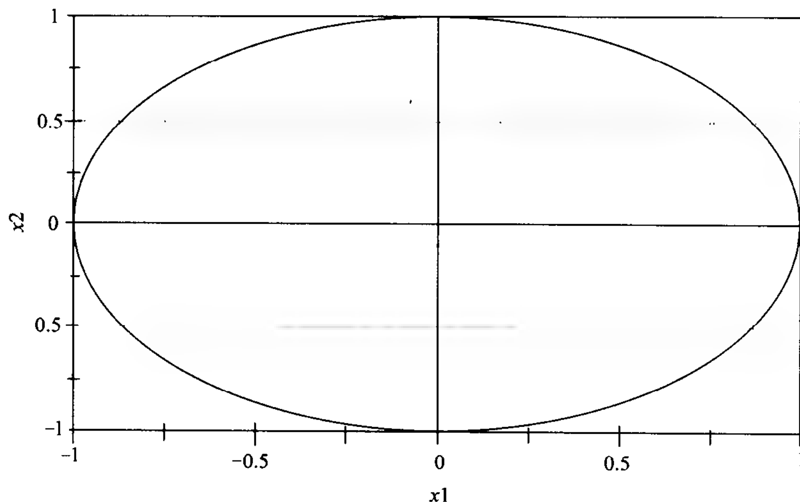


图 5-13　对接问题的动态，初始条件

$S=\{(x_1, x_2): x_1^2+x_2^2=1\}$

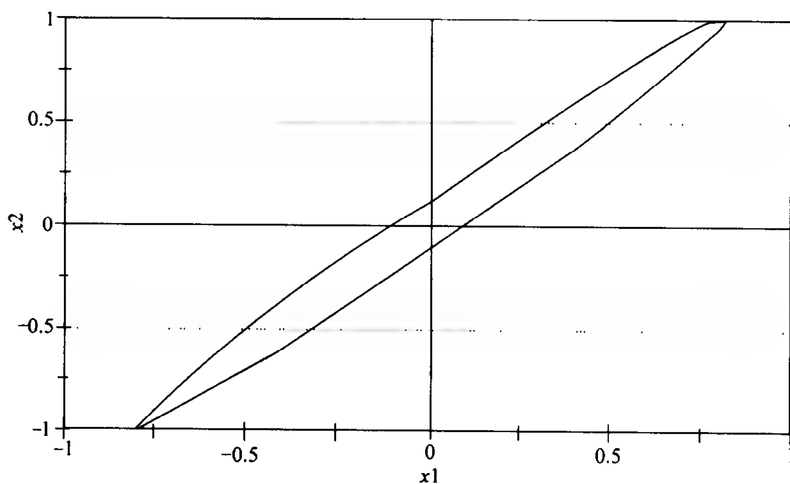


图 5-14　对接问题的动态，一次迭代 $A(S)$后

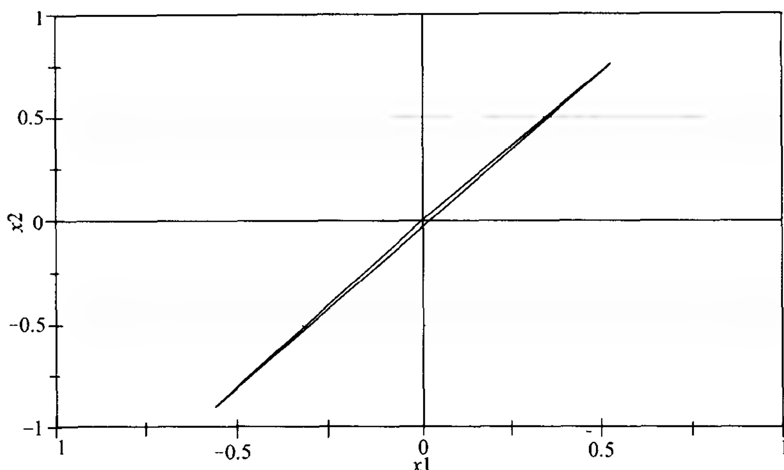


图 5-15 对接问题的动态，二次迭代 $A^2(S)$后

5.4 习题

1. 重新考虑第 4 章习题 4.

   (a)画出这个模型的向量场. 确定状态空间中每个平衡点的位置. 从这个向量场你是否能指出哪些平衡点是稳定的.

   (b)应用特征值方法检验状态空间中每个平衡点的稳定性.

   (c)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

   (d)利用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图. 184

   (e)目前估计有 5 000 蓝鲸和 70 000 长须鲸，这个模型对这两个生物种的未来的预言是什么?

2. 重新考虑第 4 章习题 5.

   (a)画出这个模型的向量场. 确定状态空间中每个平衡点的位置.

   (b)应用特征值方法检验状态空间中每个平衡点的稳定性.

   (c)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

   (d)利用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图.

   (e)目前估计有 5 000 蓝鲸和 70 000 长须鲸，这个模型对这两个生物种的未来的预言是什么?

3. 重新考虑第 4 章习题 6. 假设捕捞系数 $q=10^{-5}$，捕捞努力量为 $E=3\ 000$ 船天/年.
185

   (a)画出这个模型的向量场。确定状态空间中每个平衡点的位置.

(b)应用特征值方法检验状态空间中每个平衡点的稳定性.

(c)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

(d)利用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图.

(e)目前估计有 5 000 蓝鲸和 70 000 长须鲸，这个模型对这两个生物种的未来的预言是什么?

4. 重做习题 3，现在假设捕捞努力量为 $E=6\ 000$ 船天/年.

5. 重新考虑第 4 章习题 7.

(a)画出这个模型的向量场。确定状态空间中每个平衡点的位置.

(b)应用特征值方法检验状态空间中每个平衡点的稳定性.

(c)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

(d)例用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图.

(e)假设生态灾难突然灭绝了这个地区 80%的磷虾，留下 150 000 条蓝鲸和每英亩 100 吨磷虾. 我们的模型关于这些鲸鱼和磷虾的未来的预测是什么?

6. 重新考虑第 4 章习题 9.

(a)应用特征值方法确定(P，Q)平衡态的稳定性，采用连续时间模型.

(b)对离散时间模型重复(a)的讨论. 你将出现在你的结果中的差别归结为什么原因?

7. 重新考虑例题 5.1 的树木问题。假设 $t=1/2$.

(a)画出这个模型的向量场。确定状态空间中每个平衡点的位置.

(b)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

186

(c)利用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图.

(d)假设在一个成熟的软材树林中引入少量的硬材树，我们的模型对这个树林的未来的预测是什么?

8. 重新考虑例题 5.1 的树木问题. 但是现在假设竞争强度太大以至于硬材树与软材树不能共存. 假设 $t=3/4$.

(a)画出这个模型的向量场. 确定状态空间中每个平衡点的位置.

(b)对每个平衡点确定在这个平衡点邻域内逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

(c)利用你刚从(a)和(c)获得的结果，画出这个系统的完整的相图.

(d)假设在一个成熟的软材树林中引入少量的硬材树，我们的模型对这个树林的未来预测是什么?

9. 重新考虑例题 5.3 的 RLC 电路问题，对参数 L 进行灵敏性分析，L 给出电容

器的电感强度. 假设 $L>0$.

(a)描述一般情形 $L>0$ 的向量场.

(b)确定使得平衡点(0, 0)稳定的 L 的取值范围.

(c)对存在两个实特征值的情形画出线性系统的相图.

(d)利用(a)和(c)的结果画出这个系统的完整的相图. 评论我们在 5.3 节中的结论对参数 L 的实际值的灵敏性.

10. 重新考虑例题 5.3 的 RLC 电路问题，但是现在假设电容 $C=1/5$.

(a)画出这个模型的向量场.

(b)运用特征值方法检验在原点的平衡态的稳定性.

(c)在原点邻域内确定逼近原动态系统行为的线性系统，然后画出线性系统的相图.

(d)利用(a)和(c)的结果画出这个系统的完整的相图. 当电容 C 降低时，RLC 电路的行为将如何变化?

11. (继续练习 10)重新考虑例题 5.3 的 RLC 电路问题，现在考虑当电容 C 在整个区间 $0<C<\infty$ 上变化时的影响.

187

(a)对情形 $0<C<1/4$，在原点邻域内画出逼近 RLC 电路行为的线性系统的相图. 与课文中已得到的关于 $C>1/4$ 情形的相图进行比较.

(b)对情形 $0<C<1/4$ 画出完整的 RLC 电路的相图. 描述在两种情形 $0<C<1/4$ 和 $C>1/4$ 之间变化时相图的改变.

(c)画出情形 $C=1/4$ 的线性系统的相图，此时只有一个特征值. 画出此时的非线性系统的相图. 解释此时的相图如何反映了具有两个不同实特征值($C>1/4$)和具有一对复共轭特征值($0<C<1/4$)这两种情形之间的中间过渡.

(d)重新考虑课文中例题 5.3 的第 5 步对电路行为的描述，用通俗的语言对一般情况 $C>0$ 介绍 RLC 电路的行为.

12. 重新考虑例题 5.2 的空间对接问题.

(a)画出这个问题的向量场.

(b)求相应于课文中得到的特征值

$$\lambda=\frac{4\pm\sqrt{6}}{10}$$

的特征向量. 在(a)给出的图中画上这些特征向量. 在这些点关于向量场你看到什么?

(c)从一个特征向量开始计算接近速度的递减率(%每分钟)

(d)一般来说，从任意的初值开始，对接近速度的递减率你能做什么预测?(提示，任意的初始条件是(在(b)中已求得的)两个特征向量的线性组合).

13. (继续习题 12)重新考虑例题 5.2 的空间对接问题.

(a)如习题 12，求接近速度下降率(%每分钟)作为控制参数 k 的函数，$0<k\leqslant 0.0268$.

(b)求接近速度下降率的最大值点 k.

(c)用控制参数的有效性解释在(b)中得到的结果的意义.

(d)将这个习题中所使用的方法推广到在整个区间 $0<k<0.2$ 上寻求最有效的 k 值，在这个区间上我们有一个稳定的控制过程.

188

14. 重新考虑例题 5.2 的空间对接问题. 但是，现在是逼近离散时间的动态系统

$$\Delta x_1 = \quad kwx_1 \quad kcx_2$$

$$\Delta x_2 = x_1 - x_2$$

利用它相应的连续时间的系统

$$\frac{dx_1}{dt} = -kwx_1 - kcx_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_1 - x_2.$$

(a)证明连续时间模型具有一个稳定的平衡态在(0，0). 假设 $w=10$，$c=5$，$k=0.02$.

(b)利用特征值和特征向量求解连续模型.

(c)画出这个模型的完整的相图.

(d)评论离散的和连续的模型性质之间的任何差别.

15. (继续习题 14)重新考虑例题 5.2 的空间对接问题. 与习题 14 一样用相应的连续时间模型代替离散时间模型.

(a)假设 $w=10$，$c=5$. 怎样的 k 值才能使得连续模型在(0，0)有一个稳定的平衡态.

(b)利用特征值和特征向量求解连续模型.

(c)画出这个模型的完整的相图. 相图是怎样依赖 k 的.

(d)评论离散的和连续的模型性质之间的任何差别.

16. 重新考虑例题 5.1 的树木问题.

(a)两种类型的树能否共处于一个稳定的平衡态? 假设 $b_i=a_i/2$. 运用五步方法，采用离散时间动态系统，一年为一个时间步长.

(b)运用特征值方法检验离散时间的动态系统，确定在(a)中找到的平衡态的稳定性.

(c)对参数 t 进行灵敏性分析，这里 $b_i=ta_i$，确定 $0<t<0.6$ 的范围，使得在(a)中找到的平衡态是稳定的.

(d)评论离散时间和连续时间的模型结论之间的任何差别. 对一个实际问题，我们对模型的选择是否会引起差别.

189

5.5 进一步的阅读文献

Beltrami, E. (1987). *Mathematics for Dynamic Modeling,* Academic Press, Orlando, FL.

Frauenthal, J. (1979). *Introduction to Population Modeling,* UMAP monograph.

Hirsch, M. and Smale, S. (1974). *Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra,* Academic Press, New York.

Keller, M. *Electrical Circuits and Applications of Matrix Methods: Analysis of Linear Circuits,* UMAP modules 108 and 112.

Press, W., Flannery, B., Teukolsky, S., and Vetterling, W. (1987). *Numerical Recipes,* Cambridge University Press, New York.

Rescigno, A. and Richardson, I. (1967). The Struggle for Life I, Two Species, *Bulletin of Mathematical Biophysics,* 29, 377–388.

Smale, S. (1972). On the Mathematical Foundations of Circuit Theory, *Journal of Differential Geometry,* 7, 193–210.

Wilde, C. *The Contraction Mapping Principle,* UMAP module 326.

190

第6章　动态模型的模拟

模拟技术已经成为最重要的和最流行的分析动态模型的方法. 在微分方程入门课程中所讲述的精确解方法具有局限性. 事实上对非常多的微分方程我们不知道如何求解. 在前两章介绍的定性分析方法可应用范围很广，但是对某些问题我们需要定量的答案和高度的精确度. 模拟方法满足这两个要求. 几乎所有的动态模型都可以按适当的精确程度模拟. 而且，模拟技术非常灵活. 可以比较容易地将一些诸如时滞或随机因素这样更复杂的属性引入模型，这些是难以用解析的方法处理的.

模拟的主要缺点在灵敏性分析方面. 无法求助解析公式，对一个特殊参数检验灵敏性的惟一办法就是对这个参数的几个不同的值重复整个模拟过程，然后再做插值. 如果有几个参数要检验，这会很耗时，并且耗费较高. 尽管如此，模拟仍是研究许多问题可取的方法. 如果我们无法得到解析解，并且需要定量解，则除了模拟我们没有别的选择.

6.1　模拟简介

分析动态系统模型有两个基本的方法. 解析方法企图根据各种情形的模型推测将会发生什么. 模拟方法则通过模型的构造，运行，看到将会发生些什么.

191

例 6.1　两支军队，我们称为红军(R)和蓝军(B)，进行战斗. 在这场常规战中，伤亡是由于直接交火(步兵)和火炮射击(炮兵). 假设直接交火的伤亡率与敌军步兵数成正比. 由炮火造成的伤亡率与敌军的炮兵数和友军的密度两者都有关系. 红军聚集了五个师袭击两个师的蓝军. 蓝军具有防御能力强的和武器精良的优势. 蓝军为赢得战斗该尽多大的努力?

我们将应用五步方法. 第一步的结果总结在图 6-1. 我们已经假设由于炮火导致的伤亡直接正比于敌军武力水平和友军武力水平的乘积. 在这里，一个似乎合理的假设是武力水平正比于军队的数量. 又因为没有相对于步兵部队的火炮数量的任何信息，为了便于分析起见，我们简单地假设炮兵和步兵部队的伤亡正比于部队的数量，所以假设双方剩下的大炮或步兵部队正比于总的部队数量.

下面是第二步. 我们将利用离散时间动态模型，对其用模拟方法求解. 图 6-2 给出具有两个变量的离散时间动态模型

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= f_1(x_1,x_2)\\ \Delta x_2 &= f_2(x_1,x_2).\end{aligned}\tag{1}$$

的求解算法.

下面是第三步. 我们将用两个状态变量：$x_1=R$，红军部队的兵力单位数量；$x_2=B$，蓝军部队兵力单位数量为战斗问题建立一个离散时间动态模型. 差分方程为

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= -a_1x_2-b_1x_1x_2\\ \Delta x_2 &= -a_2x_1-b_2x_1x_2.\end{aligned}\tag{2}$$

变量：

R=红军单位数(师)

B=蓝军单位数(师)

D_R=由直接交火导致的红军丧亡率(单位/小时)

D_B=由直接交火导致的蓝军丧亡率(单位/小时)

I_R=由间接交火导致的红军丧亡率(单位/小时)

I_B=由间接交火导致的蓝军丧亡率(单位/小时)

假设：

$D_R=a_1B$

$D_B=a_2R$

$I_R=b_1RB$

$I_B=b_2RB$

$R\geqslant0$，$B\geqslant0$

$R(0)=5$，$B(0)=2$

a_1，a_2，b_1，b_2 是正实数

$a_1>a_2$，$b_1>b_2$

目标： 确定条件使得在 $B\to0$ 之前，$R\to0$

192

图 6-1　战斗问题第一步结果

```
算法：离散时间模拟
变量：x1(n)=在时刻 n 的第 1 状态变量
      x2(n)=在时刻 n 的第 2 状态变量
        N=时间阶段数
输入：x1(0)，x2(0)，N
过程：Begin
      for n=1 to N do
        Begin
          x1(n)←x1(n-1)+f1(x1(n-1)，x2(n-1))
          x2(n)←x2(n-1)+f2(x1(n-1)，x2(n-1))
        End
      End
输出：x1(1)，…，x1(N)
      x2(1)，…，x2(N)
```

193

图 6-2　离散时间模拟的伪代码

我们从 $x_1(0)=5$ 和 $x_2(0)=2$ 个师开始．使用 $\Delta t=1$ 小时为一个时间步长．还需要确定 a_i 和 b_i 的值才能进行模拟过程．不幸的是对它们应该取什么值我们还没有任何的信息．所以我们不得不进行一个有根据的推测．设一个典型的正规战斗进行大约 5 天，每天持续约 12 小时．这意味着一支部队在大约 60 小时的战斗中减员．如果一支队伍在 60 小时内每小时减员 5%，那么剩余的部分将是 $(0.95)^{60}=0.05$，结果看来正确．我们假设 $a_2=0.05$．因为炮火在杀伤力方面通常不如直接交火有效，我们假设 $b_2=0.005$．(注意到 b_2 与 x_1 和 x_2 相乘，这就是为什么我们要将它的值取得如此小．)现在假设蓝军比红军具有更有效的武器，

因此 $a_1>a_2$ 且 $b_1>b_2$. 假设 $a_1=\lambda a_2$, $b_1=\lambda b_2$, $\lambda>1$. 分析的目的是要确定最小的 λ 使得在 $x_2\to 0$ 之前，$x_1\to 0$ 成立. 于是差分方程为

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= -\lambda(0.05)x_2-\lambda(0.005)x_1x_2\\ \Delta x_2 &= -0.05x_1-0.005x_1x_2.\end{aligned}\tag{3}$$

在第四步我们将通过对若干个 λ 的值运行模拟程序求解这个问题. 分别对 $\lambda=1$、1.5、2、3 和 5 运行这个模型. 这样可以使我们知道 λ 应该是多大，同时也便于对照模拟结果与我们的直觉判断. 例如，我们可以检验是否 λ 越大，对蓝军越有利.

模型第一次运行结果显示在图 6-3 到图 6-7 中. 我们所看到的结果总结在表 6-1 中. 对每次运行我们都记录了 λ 的值、战斗的时间、赢者和赢者剩下的部队. 我们决定模拟 14 个战斗日(或者说 $N=168$ 个小时). 战斗时间定义为实际作战的小时数(每天作战 12 小时)直到变量 x_1 和 x_2 中的某一个为零或为负值.

194 如果双方在 168 小时战斗后仍存在，我们称这场战斗为平局.

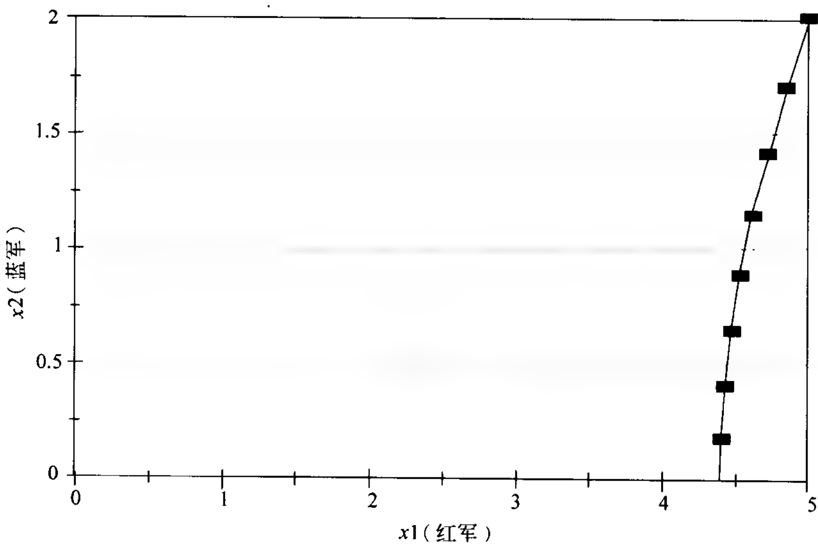


图 6-3 战斗问题：情形 $\lambda=1.0$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

表 6-1 对战役问题模拟结果的总结

优势(λ)	战役经历·小时数	赢方	剩余队伍
1.0	8	红军	4.4
1.5	9	红军	4.1
2.0	9	红军	3.7
3.0	10	红军	3.0
5.0	17	红军	1.0

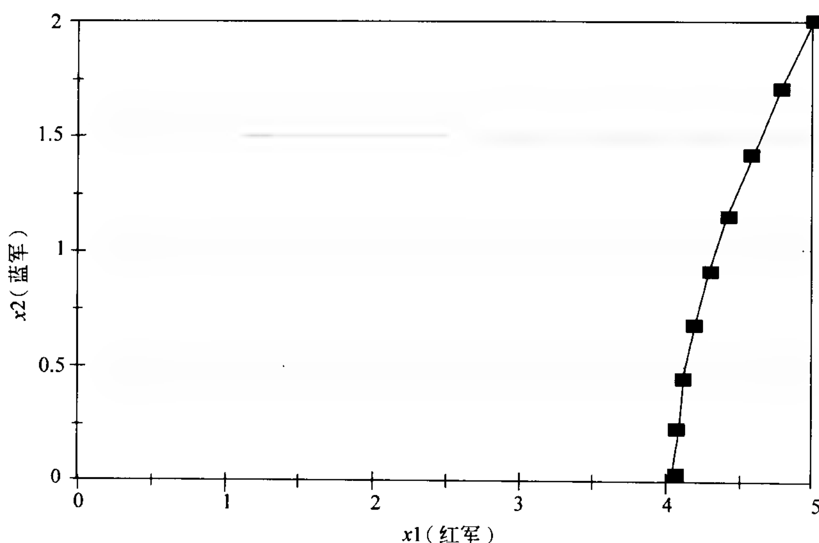


图 6-4 战斗问题：情形 $\lambda=1.5$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

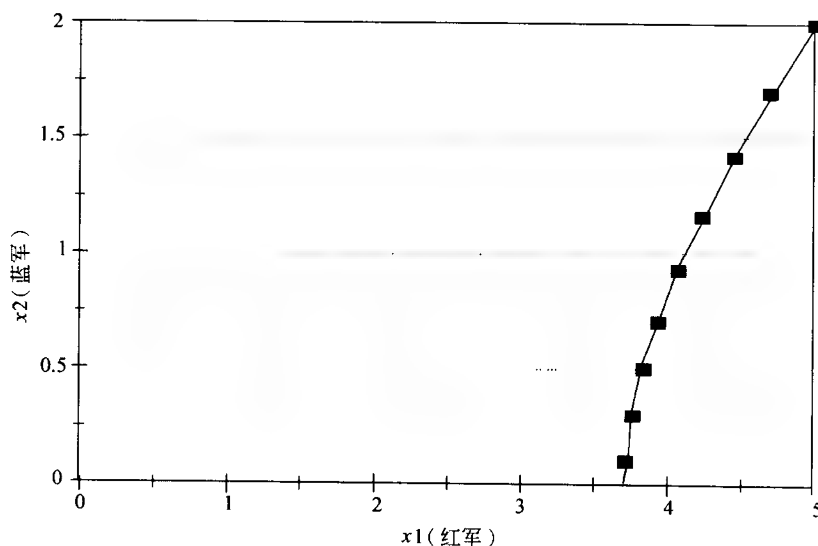


图 6-5 战斗问题：情形 $\lambda=2.0$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

看起来蓝军的结果并不好. 甚至在武器优势达 5∶1 的情形下，蓝军仍将失败. 我们决定做更多的模型运算，以便发现为使蓝军胜利的 λ 应该是多大. 在 $\lambda=6.0$ 时，蓝军在经历了 13 个小时的战斗后取胜，剩余 0.6 个单位(图 6-8). 用二分法在区间 $5.0\leqslant\lambda\leqslant6.0$ 上搜寻，多运行几次模型，得到蓝军获胜的下界为 $\lambda=5.4$. 在 $\lambda=5.3$ 红军为赢者.

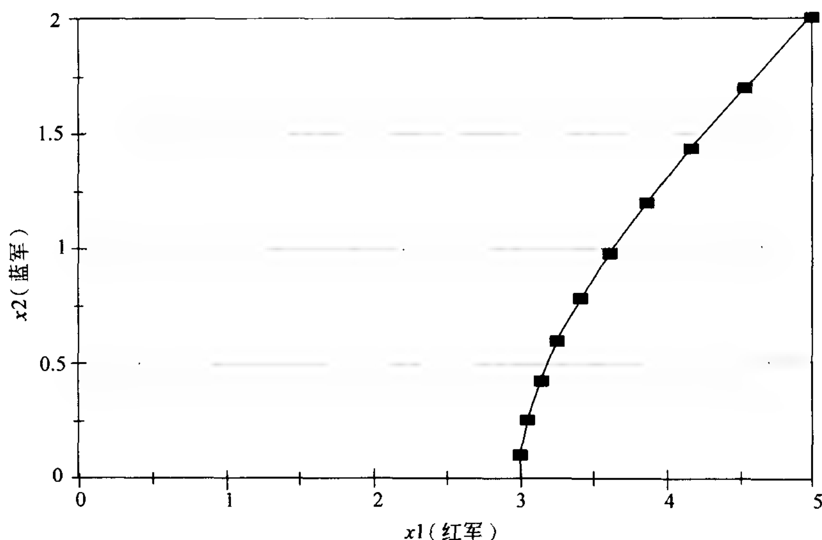


图 6-6　战斗问题：情形 $\lambda=3.0$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

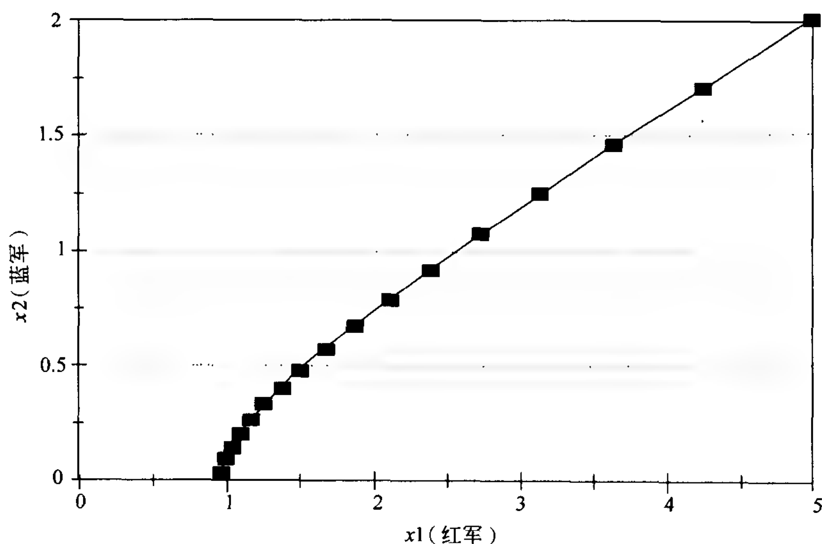


图 6-7　战斗问题：情形 $\lambda=5.0$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

最后，我们要总结一下我们结果．我们模拟了一场 5 个师的红军进攻和 2 个师的蓝军防守的交战．我们假设双方全力投入并坚持战斗直到一方完全获胜．我们要研究能够弥补数量上处于 5∶2 的劣势的武器有效性(杀伤力)的强度．我们对不同的武器精良性比率模拟了若干次战斗．我们发现蓝军需要至少 5.4∶1 的武器上的优势才能战胜数量处于优势的 5 个师的红军队伍．

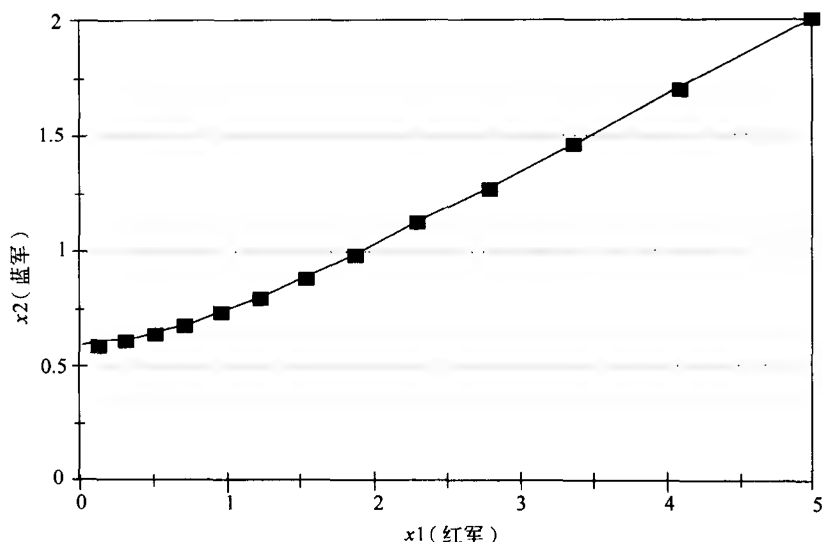


图 6-8　战斗问题：情形 $\lambda=6.0$，蓝军 x_2 个师对抗红军 x_1 个师的图

在完成五步方法且回答了在第一步中提出的问题之后，我们需要进行灵敏性分析. 对这类多数数据完全来自猜测的问题做这样的分析特别重要. 我们从研究伤亡系数的数值和战斗结果之间的关系入手. 已经假设 $a_2=0.05$，$b_2=a_2/10$，$a_1=\lambda a_2$ 和 $b_1=\lambda b_2$. 现在我们让 a_2 变化，且保持它与其他变量的关系.

我们将研究 $\lambda_{\min}$对 a_2 的依赖关系，这里 $\lambda_{\min}$定义为使得蓝军取胜的最小的 λ 值. 于是对每个 a_2 值运行模型若干次. 不需要将结果都列表表示，因为对每种情形我们都检验(从 $a_2=0.01$ 到 $a_2=0.10$)发现 $\lambda_{\min}=5.4$，正如在基本情形($a_2=0.05$)得到的那样. 显然 $\lambda_{\min}$对伤亡系数的数值一点都不敏感.

还可以进行其他各种灵敏性分析，并且分析过程可以继续下去，只要时间容许、好奇心持续不断、又没有其他工作压力. 我们甚至对 $\lambda_{\min}$和红军与蓝军的数量上优势率之间的关系感兴趣，这里假设优势率为 5∶2. 为研究这个问题我们回到基本情况，$a_2=0.05$，为确定 $\lambda_{\min}$，对各种不同的红军力量强度初值 x_1 和固定的 $x_2=2$，运行模型. 这样进行的模型浏览得到的结果列于表 6-2. 运算情形 $x_1=2$ 只是为了验证. 我们得到此时 $\lambda_{\min}=1.1$，因为 $\lambda=1$ 只会导致战平.

6.2　连续时间模型

在这一节我们讨论模拟连续时间动态系统的基本问题. 呈现在这里的方法是简单的，并且通常是有效的. 基本的想法是借助逼近

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\approx\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

用离散时间模型(差分方程)代替连续时间模型(微分方程). 然后我们可以利用前

一节引入的模拟方法.

表 6-2　对战役问题模拟结果的总结，显示力量对比率

力量对比率(红军：蓝军)	所要求的优势(λ_{min})
8：2	11.8
7：2	9.5
6：2	7.3
5：2	5.4
4：2	3.6
3：2	2.2
2：2	1.1

例 6.2　重新考虑例题 4.2 的捕鲸问题. 从现有种群数量 $B=5\,000$，$F=70\,000$ 开始，假设竞争系数为 $\alpha<1.25\times10^{-7}$，在没有捕捞的情形下，两个鲸鱼种群将恢复到它们的自然水平. 这需要多长时间?

195～197

我们将应用五步方法. 第一步与前面相同(见图 4-3)，只是现在的目标为确定从状态 $B=5\,000$，$F=70\,000$ 达到平衡态需要多长时间.

第二步是选择建模的方法. 我们面对的一个似乎需要定量方法的分析问题. 第 4 章的图方法告诉我们将会发生什么，但没有告诉我们需要多长时间才会发生. 第 5 章提到的分析方法实际上是局部的. 这里我们需要一个整体分析方法. 最好是求解这个微分方程，但我们不知道如何求解. 我们将应用模拟方法，这似乎是我们仅有的选择.

问题是我们应采用离散时间的还是连续时间的模型. 更一般的，让我们考虑 n 个变量的动态模型，$x=(x_1,\cdots,x_n)$，给定每个变量 $x_1,\cdots,x_n$ 的变化率 $F=(f_1,\cdots,f_n)$，但我们还是没有确定对这个系统采用离散时间的还是连续时间的模型. 离散时间模型看起来是

198

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= f_1(x_1,\cdots,x_n)\\ &\vdots\\ \Delta x_n &= f_n(x_1,\cdots,x_n),\end{aligned}\tag{4}$$

其中 Δx_i 表示在 1 个单位时间($\Delta t=1$)内 x_i 的变化. 时间单位早已给定. 对这样的一个系统的模拟方法在前一节已经讨论过.

如果我们决定用连续时间模型，将得到

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1,\cdots,x_n)\\ &\vdots\\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(x_1,\cdots,x_n),\end{aligned}\tag{5}$$

对此我们需要描述如何进行模拟. 我们确实不能希望计算机对每一个 t 值计算出 $x(t)$. 那将花费无穷的时间且得不到任何结果. 实际上我们必须在有限个时间点

上计算 $x(t)$. 换句话说，为了模拟我们必须用一个离散时间的模型代替连续时间模型. 什么样的离散时间模型能够逼近这样的连续时间模型？如果我们应用时间步长 $\Delta t=1$，它将与我们在第一步选取的离散时间模型完全一致. 除非因为选择 $\Delta t=1$ 导致错误，我们不必在离散与连续之间做选择. 这样我们已完成第二步. 199～200

第三步是将模型公式化. 如在第 4 章所做的一样，令 $x_1=B$，$x_2=F$ 表示每个种的种群水平. 动态系统在状态空间 $x_1\geqslant 0$，$x_2\geqslant 0$ 的方程是

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} &= 0.05x_1\left(1-\frac{x_1}{150\ 000}\right)-\alpha x_1x_2\\ \frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}t} &= 0.08x_2\left(1-\frac{x_2}{400\ 000}\right)-\alpha x_1x_2\end{aligned}\tag{6}$$

为了模拟这个模型我们将从在同样的状态空间上变换后的差分方程开始

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= 0.05x_1\left(1-\frac{x_1}{150\ 000}\right)-\alpha x_1x_2\\ \Delta x_2 &= 0.08x_2\left(1-\frac{x_2}{400\ 000}\right)-\alpha x_1x_2\end{aligned}\tag{7}$$

这里 Δx_1 表示种群 x_1 在一年的时间阶段 $\Delta t=1$ 上的变化. 为运行这个程序我们必须提供 α 值. 开始假设 $\alpha=10^{-7}$后面我们将对 α 做灵敏性分析. 201

第四步是通过运用计算机执行图 6-2 中的算法，模拟方程组(7)的系统，求解这个问题. 先模拟 $N=20$ 年，从

$$x_1(0) = 5\ 000$$
$$x_2(0) = 70\ 000$$

开始. 在图 6-9 和 6-10 展示了我们模型运行的结果. 蓝鲸和长须鲸有规律地增长，但在 20 年内它们没有接近我们在第 4 章分析所预言的平衡态. 图 6-11 和 6-12

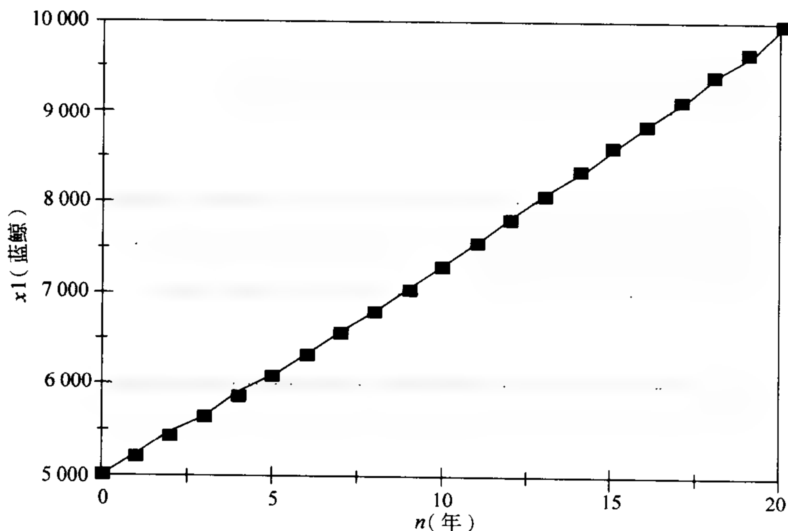


图 6-9　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-7}$，$N=20$ 时蓝鲸 x_1 随时间 n 变化的图

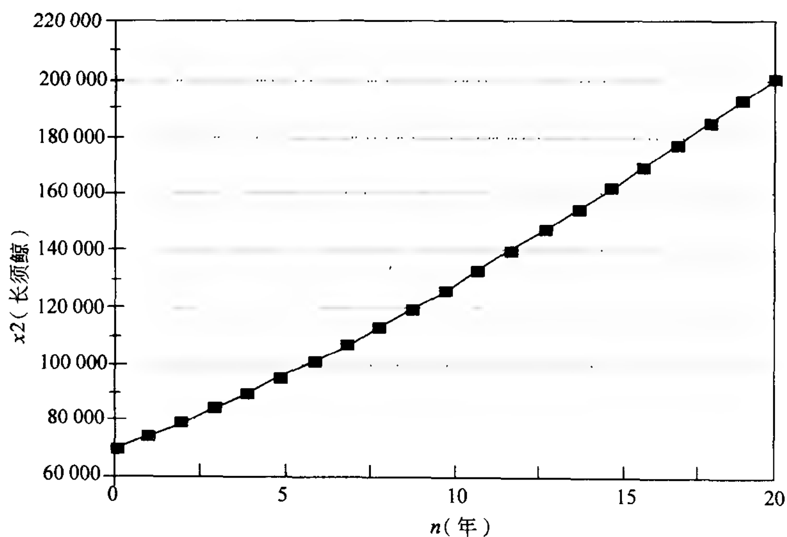


图 6-10　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-7}$，$N=20$ 时长须鲸 x_2 随时间 n 变化的图

202

$$x_1 = 35\ 294$$

$$x_2 = 382\ 352$$

展示了当我们设 N 足够的大，使得这个离散时间动态系统充分地接近它的平衡态时的模拟结果.

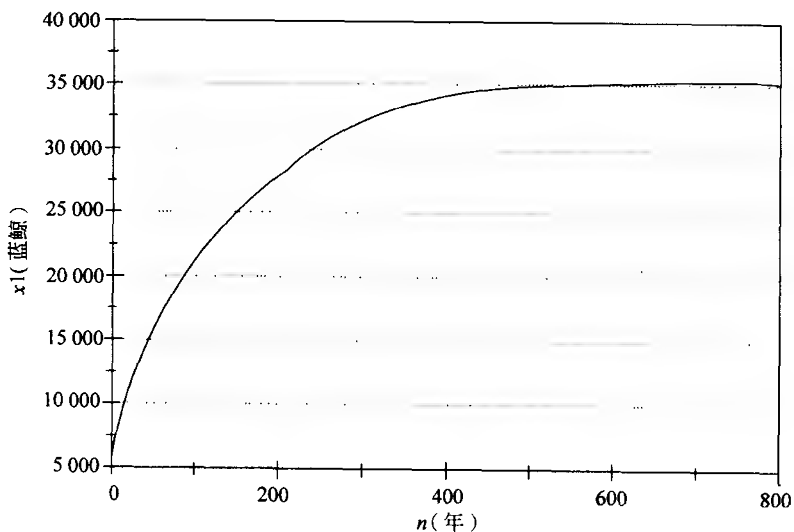


图 6-11　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-7}$，$N=800$ 时蓝鲸 x_1 随时间 n 变化的图

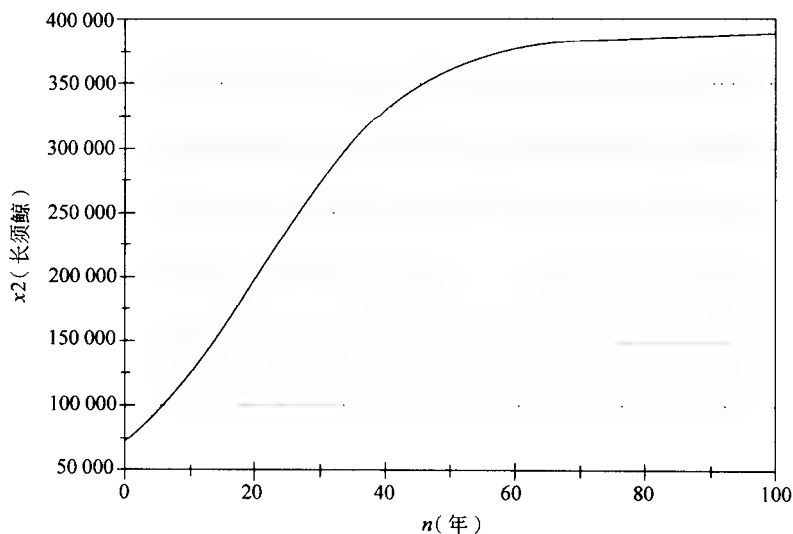


图 6-12 捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-7}$，$N=100$ 时长须鲸 x_2 随时间 n 变化的图

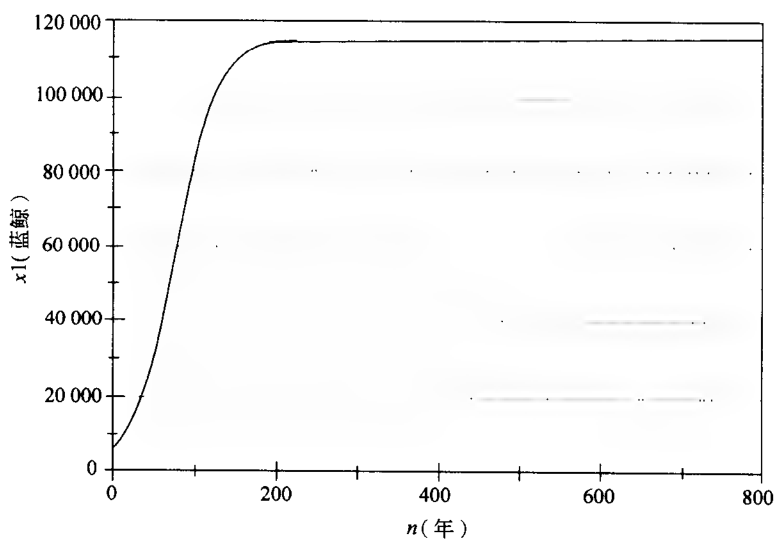


图 6-13 捕鲸问题：当 $\alpha=3\times10^{-8}$，$N=800$ 时，蓝鲸 x_1 随时间 n 变化的图

第五步是用通俗的语言表达我们的结果. 鲸鱼种群的恢复需要很长的时间——长须鲸大约需要 100 年，而对更严重衰减的蓝鲸需要几个世纪.

现在我们将讨论我们的结果对参数 α 的灵敏性，这个参数反映了两个种群竞争的程度. 图 6-13 到 6-18 展示了对几个不同的 α 值模型模拟的结果. 当然对不同的

α 值两个种群的平衡态不同．但是收敛到平衡态所需的时间变化不大．因此我们的一般结论对任何的竞争程度是有效的：鲸鱼种群需要几个世纪才能恢复．

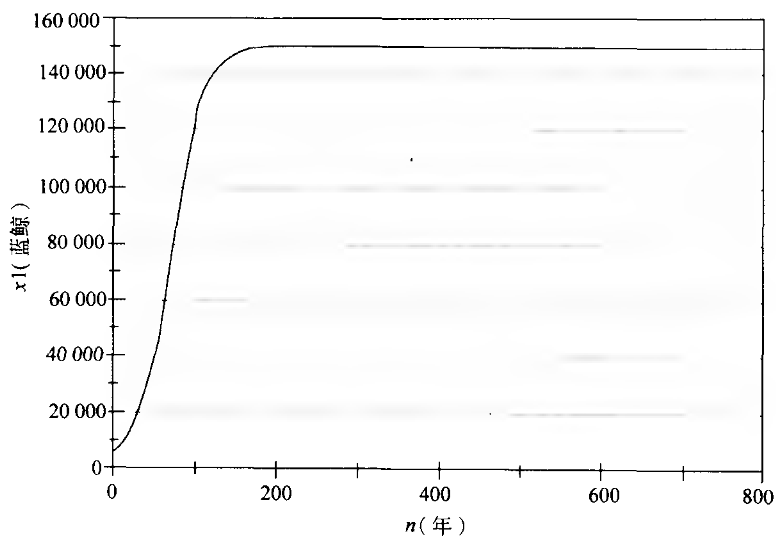


图 6-14　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-8}$，$N=800$ 时，蓝鲸 x_1 随时间 n 变化的图

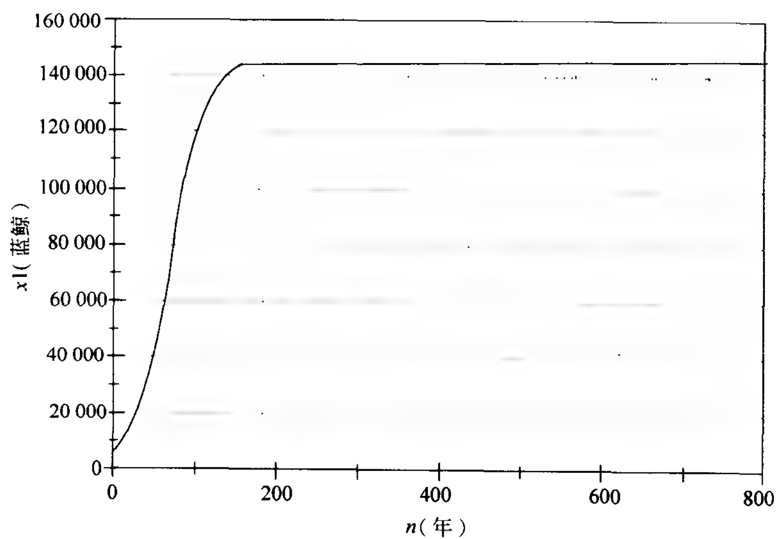


图 6-15　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-9}$，$N=800$ 时，蓝鲸 x_1 随时间 n 变化的图

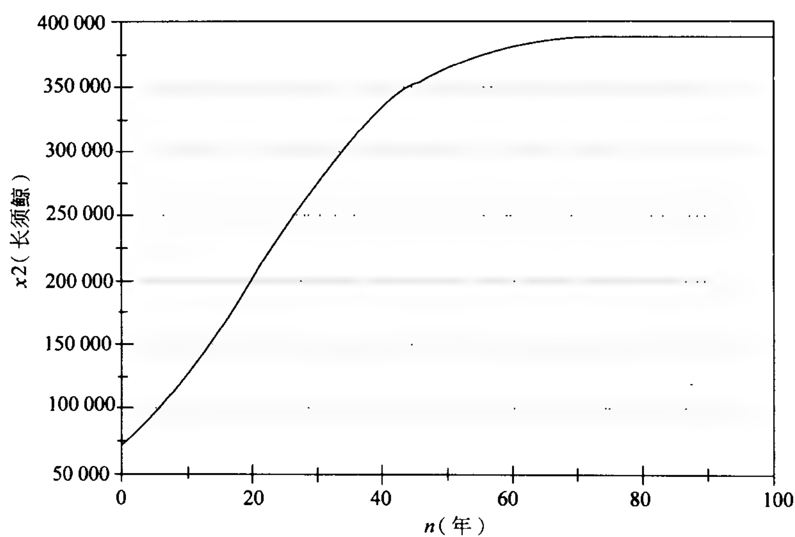


图 6-16　捕鲸问题：当 $\alpha=3\times10^{-8}$，$N=100$ 时，长须鲸 x_2 随时间 n 变化的图

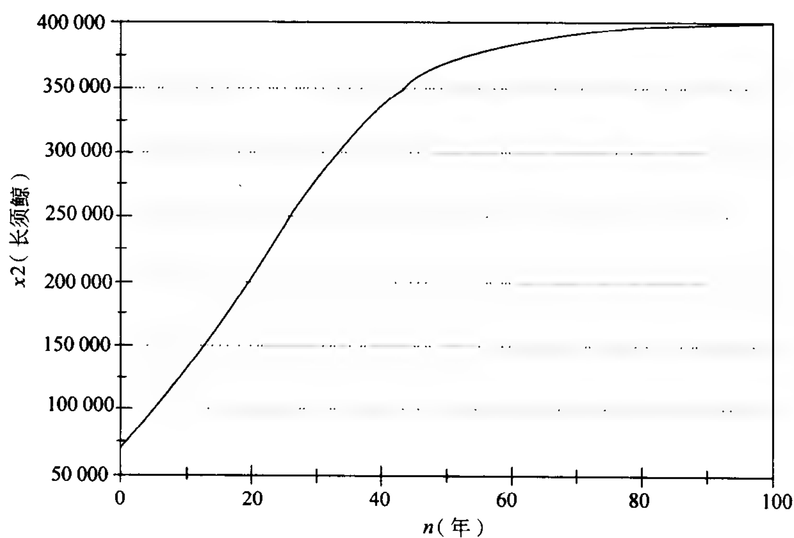


图 6-17　捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-8}$，$N=100$ 时，长须鲸 x_2 随时间 n 变化的图

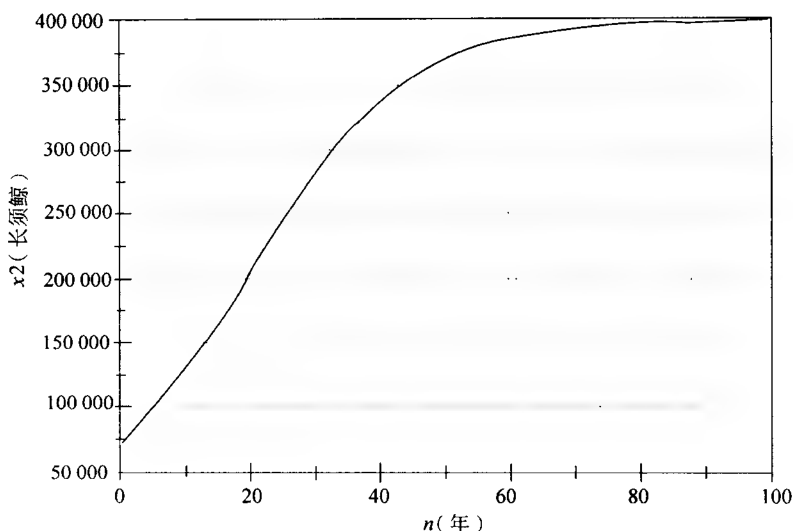


图 6-18 捕鲸问题：当 $\alpha=10^{-9}$，$N=100$ 时，长须鲸 x_2 随时间 n 变化的图

6.3 欧拉方法

我们模拟动态模型的理由之一就是为获得系统行为的准确的定量信息. 对某些应用来说前一节简单的模拟技巧太不精确. 而且，确实有更精巧的数值分析技巧可以利用，对几乎任何微分方程模型可以求得初值问题的精确解. 在这一节我们提供一个最简单的能够达到所需精确度的求解微分方程系统的通常有效的方法.

例 6.3 重新考虑前一章例题 5.4 的 RLC 电路问题. 描述这个电路的行为.

在 5.3 节我们仅仅是成功地确定了动态系统

$$
\begin{aligned}
x_1' &= x_1 - x_1^3 - x_2 \\
x_2' &= x_1
\end{aligned}
\tag{8}
$$

在(0，0)邻域内的局部性质，这是该系统惟一的平衡点. 这个平衡点不稳定，附近的解曲线逆时针方向旋转向外. 向量场草图(见图 5-11)几乎没有提供任何新的信息. 存在逆时针的旋转流，但是(在缺少附加信息下)难以断定解曲线是旋转向内、还是向外或两者都不是.

我们将使用欧拉方法模拟动态系统(8). 图 6-19 给出欧拉方法的算法. 考虑连续时间的动态系统模型

$$x' = F(x)$$

其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$ 且 $F=(f_1, \cdots, f_n)$，带有初始条件 $x(t_0)=x_0$.

从初始条件开始，利用

$$x(t+h) - x(t) \approx hF(x(t)).$$

```
算法：欧拉方法
变量：t(n)=n 步后的时间
      x1(n)=在时刻 t(n)的第 1 状态变量
      x2(n)=在时刻 t(n)的第 2 状态变量
      N=步数
      T=模拟结束时间
输入：t(0)，x1(0)，x2(0)，N，T
过程：Begin
      h←(T−t(0))/N
      for n=0 to N−1 do
      Begin
        x1(n+1)←x1(n)+hf1(x1(n)，x2(n))
        x2(n+1)←x2(n)+hf2(x1(n)，x2(n))
        t(n+1)←t(n)+h
        End
      End
输出：t(1)，…，t(N)
      x1(1)，…，x1(N)
      x2(1)，…，x2(N)
```

图 6-19　欧拉方法的伪代码

欧拉方法的每一次迭代产生一个基于 $x(t)$ 估计的对 $x(t+h)$ 的估计．当步长 h 变小时，即步数 N 增大，欧拉方法的精确度增加．对小的 h 值，状态变量的最终值 $x(N)$ 估计的误差大约与 h 成正比．换句话说，使用两倍多的步数(即 h 减小一半)会增加两倍的精确度．

203 ~ 205

图 6-20 和图 6-21 说明对方程组(8)应用计算机执行欧拉方法得到的结果．在图 6-20 和图 6-21 中的每个图形都是几次模拟运行后得到的结果．对每个初始条件集合我们需要对输入参数 T 和 N 进行一次灵敏性分析．首先我们增大 T，直到进一步的增大也产生基本相同的图像(求解仅仅是多做了几次的循环)．然后我们增大 N，(即减小步长)检验精确度．如果两倍的 N 产生的图像与前一个图像没有明显的不同，我们就认为对我们的要求来说 N 已经足够大了．

在图 6-20 我们从 $x_1(0)=-1$，$x_2(0)=-1.5$ 开始．结果解曲线逆时针方向旋转地趋向原点．但是，在它接近原点时，解开始或多或少的具有周期行为，绕着原点旋转．当我们从原点附近出发，在图 6-21，同样的行为发生了，只是现在解曲线旋转向外．在两种情形解都逼近同一条绕着原点的闭轨线．这条闭轨线被称为**极限环**．

206

图 6-22 展示了这个动态系统的完整的相图．对除了 $(x_1, x_2)=(0, 0)$ 以外的任何初始条件，解曲线趋向于同一个极限环．从这个环的内部开始，解曲线旋转向外；从这个环的外部开始，解曲线旋转向内．在图 6-22 看到的这种行为在

线性系统中不会出现．如果线性动态系统的解旋转趋向原点，则它将总是旋转地趋向原点．如果它旋转向外，则它总是旋转向外直到无穷远．这个观察含有建模的暗示．任何一个具有在图 6-22 中所展示的那种行为的动态系统不能用线性微分方程恰当地建模．

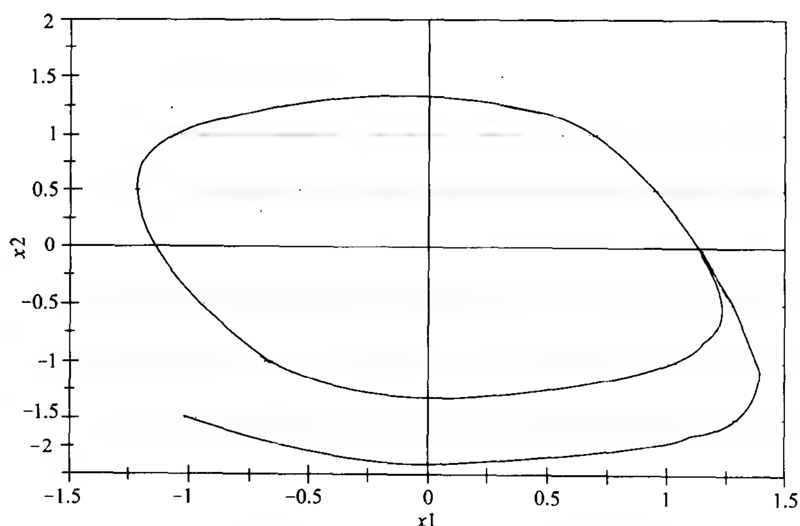


图 6-20　非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=-1.0$，$x_2(0)=1.5$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

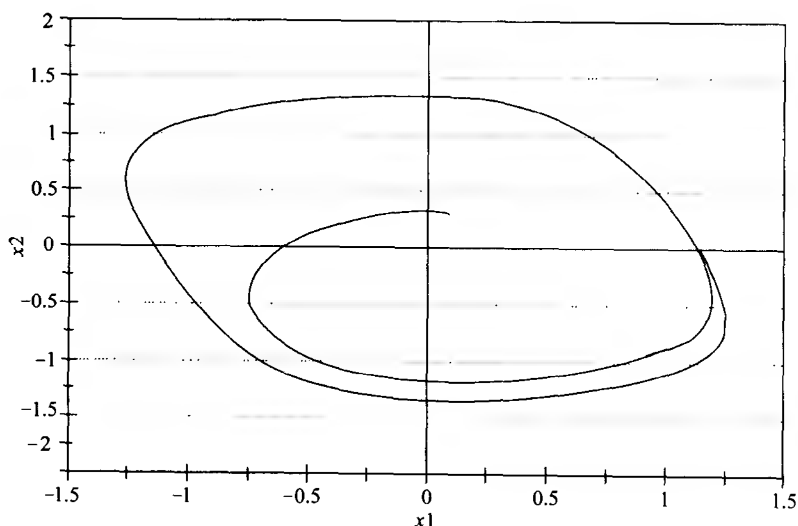


图 6-21　非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=0.1$，$x_2(0)=0.3$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

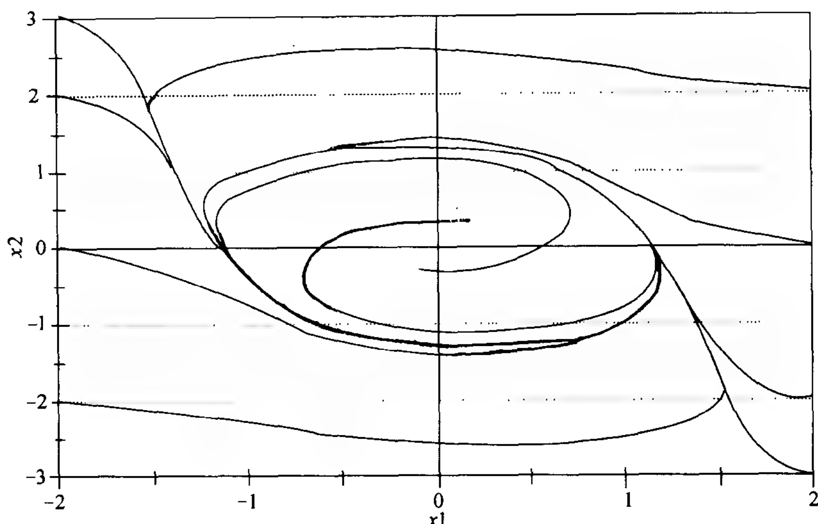


图 6-22　电压 x_2 随电流 x_1 变化的图，展示了例题 6.3 非线性 RLC 电路问题的完整的相图

制作图 6-20 到 6-22 中的图像应用了欧拉方法的电子表格软件. 电子表格软件的优势是将计算与作图放在同一个平台执行，并且改变初始条件所产生的结果可以及时观测到. 一个简单的执行这个算法的计算机程序是有效的，但是如果没有图形就很难解释输出的结果. 许多图形计算和计算机代数系统也安装微分方程求解工具，大多数基于某种改进的欧拉方法. 龙格库塔方法是一种在 $x(t)$ 和 $x(t+h)$ 之间使用了更精细插值的改进，见这一章末的习题 21. 不论你用哪一种的数值方法求解微分方程，一定要通过对控制精度的参数进行灵敏性分析来检验你的结果. 除非细心的使用，否则最精细的算法都可能导致严重的错误. 207

下一步我们将进行灵敏性分析，以确定我们假设的微小改变对我们一般结果的影响. 这里我们将讨论电容的灵敏性. 对灵敏性和稳健性的其他问题的讨论放在本章末的习题中. 在我们的例子中假设 $C=1$. 对更一般的情形我们获得动态系统 208

$$
\begin{aligned}
x_1' &= x_1 - x_1^3 - x_2 \\
x_2' &= \frac{x_1}{C}.
\end{aligned}
\tag{9}
$$

对任意 $C>0$ 的向量场都基本与图 5-11 相同. 速度向量在曲线 $x_2=x_1-x_1^3$ 上呈垂直态，在 x_2 轴上呈水平态. 惟一的平衡态是原点(0, 0).

偏导数矩阵是

$$
A = \begin{pmatrix} 1-3x_1^2 & -1 \\ 1/C & 0 \end{pmatrix}.
$$

计算它在 $x_1=0$，$x_2=0$ 的值，得到线性系统

209

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1/C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \tag{10}$$

它与我们的非线性系统在原点附近有类似的性质．为获得特征值我们必须求解

$$\begin{vmatrix} \lambda - 1 & 1 \\ -1/C & \lambda - 0 \end{vmatrix} = 0,$$

或 $\lambda^2 - \lambda + 1/C = 0$．特征值是

$$\lambda = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{C}}}{2}. \tag{11}$$

只要 $0 < C < 4$，根号下的值为负，则我们有两个正实部的复共轭特征值，于是原点是不稳定的平衡态．

下一步我们需要考虑线性系统的相图．可以通过求特征值和特征向量的方法求解系统(10)，尽管比较繁琐．幸运的是在目前情况下为画出相图并不需要确定方程(10)精确的解析解的公式．我们已经知道这个系统的特征值具有形式 $\lambda = a \pm ib$，其中 a 为正数．正如我们在 5.1 节提到的(在讨论例题 5.1 的第二步)，这暗示了任何解曲线的坐标必为两个函数项 $e^{at}\cos(bt)$ 和 $e^{at}\sin(bt)$ 的线性组合．换句话说，每条解曲线向外旋转．对方程(10)的向量场的粗略检验得知旋转必须按逆时针方向．于是我们得到对任意 $0 < C < 4$，方程(10)的线性系统的相图看起来与在图 5-12 中的非常相像．

210

我们对线性系统(10)的检验表明对任意处于原始的 $C=1$ 附近的 C 值，非线性系统在原点附近的性质必须基本上与图 6-22 的一样．为了考察在远离原点处的情况，我们需要进行模拟．图 6-23 到图 6-26 展示了利用欧拉方法对几个不同的在 1 附近的 C 值模拟动态系统(9)的结果．每次模拟运行我们都从同图 6-21 一

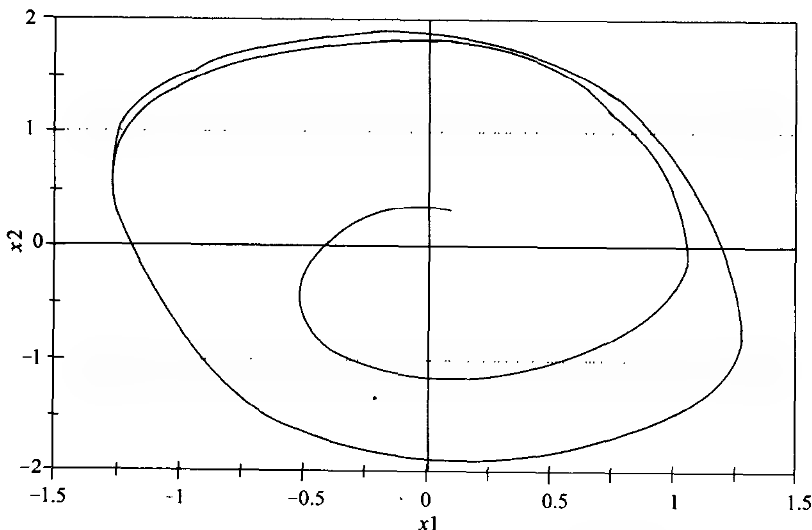


图 6-23 非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=0.1$，$x_2(0)$ 0.3，$C=0.5$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

样的初值开始．每次解曲线都旋转向外且逐渐地被吸引向极限环．当 C 增大时，极限环缩小．对每个 C 值都用几个不同的初始条件实验．（附加的模拟没有都展示出来．）显然，对每种情况都只有一个极限环吸引离开原点的解曲线．总之，例题 6.3 的 RLC 电路对所有处于 1 附近的电容值 C，具有图 6-22 所展示的性质．

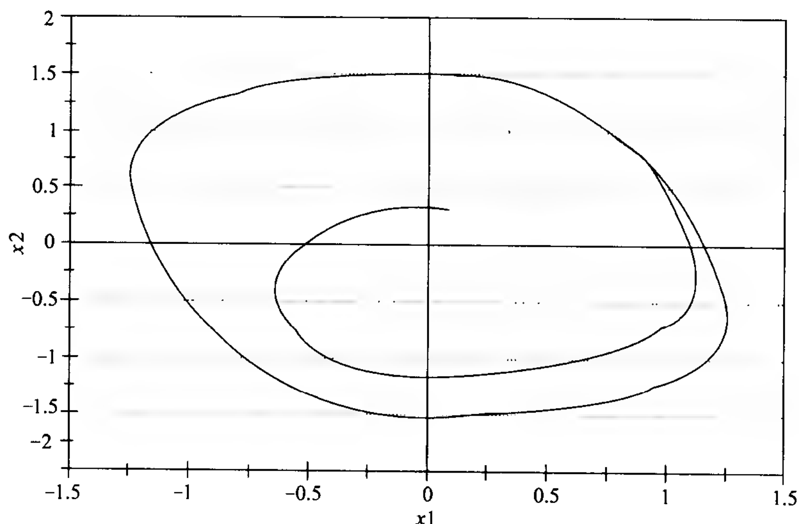


图 6-24　非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=0.1$，$x_2(0)=0.3$，$C=0.75$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

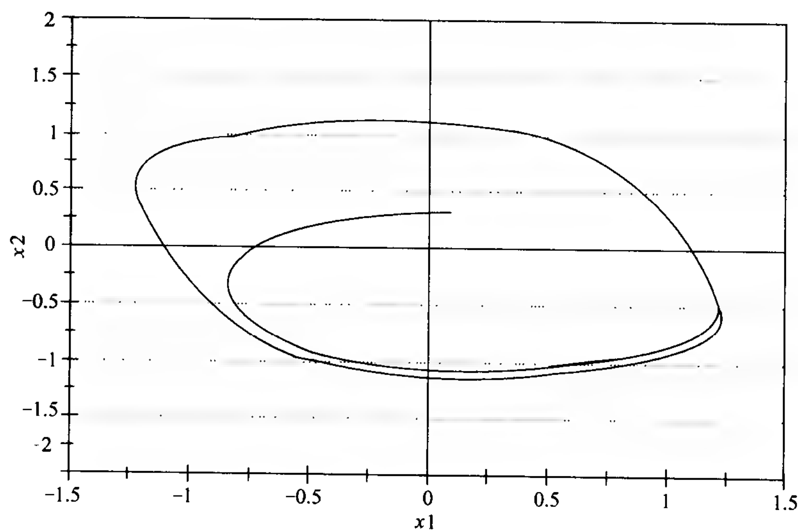


图 6-25　非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=0.1$，$x_2(0)=0.3$，$C=1.5$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

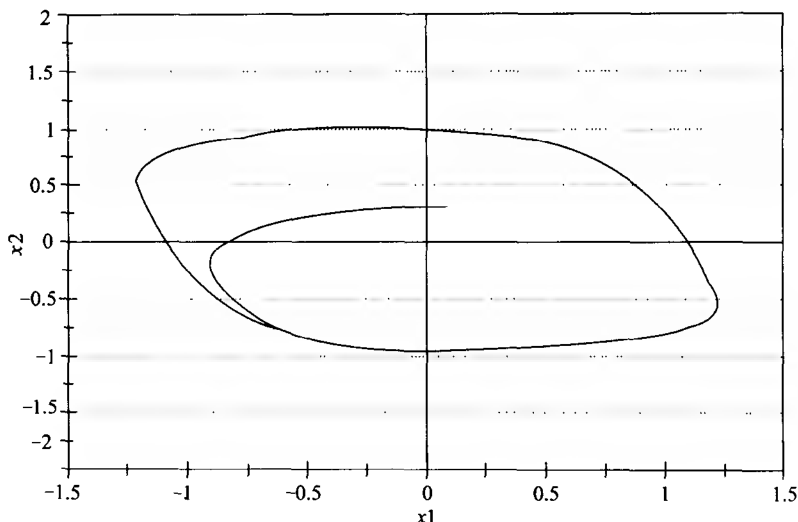


图 6-26　非线性 RLC 电路问题：当 $x_1(0)=0.1$，$x_2(0)=0.3$，$C=2.0$ 时，电压 x_2 随电流 x_1 变化的图

6.4　混沌与分形

212 20 世纪最令人兴奋的数学发现之一是某些动态模型的混沌行为．混沌的特征是解的明显的随机行为，以及对初始条件的极端敏感．混沌动态系统能产生被称为分形的奇异极限集．混沌动态系统模型被运用于处理湍流、具有非周期种群波动的生态系统、心律不齐、地球磁极的偶然逆转、复杂的化学反应、激光和股票市场．多数的应用都是有争议的，并且仍在探索它们内在的本质．混沌最令人惊讶的现象之一的是它能从简单的非线性动态模型中显现出来．

例 6.4　重新考虑例题 4.2 的鲸鱼问题，但现在我们用一个离散模型刻画种群的增长，以若干年为一个时间步长．我们知道以一年为一个时间步长，离散的和连续的时间模型的行为基本相同．我们可以用多长作为一个时间步长，以保证我们模型的性质不变？如果我们使用太长的时间步长，模型将会发生什么变化？ 213

我们将使用五步方法．第一步的结果与图 4-3 所示相同．在第二步我们具体给定一个连续时间动态系统模型，并用欧拉方法模拟求解．

考虑一个连续时间的动态系统模型

$$\frac{dx}{dt} = F(x) \tag{12}$$

其中 $x=(x_1, \cdots, x_n)$ 且 $F=(f_1, \cdots, f_n)$，带有初始条件 $x(t_0)=x_0$．欧拉方法利用一个离散时间动态系统

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = F(x) \tag{13}$$

逼近连续时间系统的性质．使用大步长的理由之一是给出大范围的预测．例如，如果时间 t 以年为单位度量，则 $\Delta x = F(x)\Delta t$ 是根据现在状态的信息，对状态变量 x 在经过 Δt 年以后的变化量的一个简单的推算．如果步长大小的选择使得相对变化量 $\Delta x/x$ 仍然很小，则离散时间系统(13)的行为将与原来连续时间系统(12)的行为非常相像．如果步长太大，则离散时间系统将展现非常不同的性质． [214]

例 6.5 考虑简单的微分方程

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -x \tag{14}$$

其中 $x>0$．将方程(14)解的性质与它的离散时间的相似方程

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = -x. \tag{15}$$

的解进行比较．(14)的解具有形式

$$x(t) = x(0)e^{-t}. \tag{16}$$

[215]

原点是稳定的平衡态，且每条解曲线指数阶地衰减到零．而方程(15)的迭代函数是

$$\begin{aligned} G(x) &= x + \Delta x \\ &= x - x\Delta t \\ &= (1-\Delta t)x. \end{aligned}$$

(15)的解具有形式

$$x(n) = (1-\Delta t)^n x(0).$$

如果 $0<\Delta t<1$，则 $x(n)\to 0$ 有指数阶那样快．并且行为与连续时间微分方程的非常相像．如果 $1<\Delta t<2$，我们仍然可以得到 $x(n)\to 0$，但是 $x(n)$ 的符号在正负之间振荡．最后，当 $\Delta t>2$ 时，$x(n)$ 在振荡的同时发散到无穷．总之，当时间步长选择使得相对变化率 $\Delta x/x$ 很小时，方程(15)的解的性质与(14)的非常相像．如果时间步长太大，方程(15)所展现的性质完全不同与它类似的连续时间的方程(14)．

对线性动态系统，离散逼近特有的时滞会导致出乎意料的性质．一个稳定的平衡态可能会变成不稳定的，新的振荡可能出现．对于线性系统，这是离散逼近的行为不同于原来连续系统的仅有的可能的方式．但是，对于非线性连续时间动态系统，离散逼近还可能导致混沌行为．在一个混沌动态系统，对初始条件有着异常的敏感，明显地伴随着个别解的随机行为．混沌通常出现在这样的情形，相互邻近的解趋向于分离但整体保持有界．这种复杂情形的组合只可能出现在非线性系统中． [216]

对离散时间动态系统混沌现象的研究是一个很活跃的研究领域．某些迭代函数生成了非常复杂的轨迹，包括分形．典型的分形是状态空间的一个点集，它是

自相似的且它的维数非整数．自相似的意思是物体包含的小部分正是它自身在小尺度下的复制品．确定维数的简单方法是计算覆盖物体所需的小盒子的数目．一个一维物体，如果小盒子是 $1/n$ 大小，那就需要 n 倍多个小盒子数．对二维物体，则需要 n^2 倍多个小盒子数，等等．对一个分形维数为 d 的物体，当盒子大小为 $1/n$ 趋于零时，盖住这个物体的盒子数以 n^d 倍增加．

217

第三步是建立模型的公式．从连续时间动态系统模型开始．

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} &= f_1(x_1,x_2) = 0.05x_1\left(1-\frac{x_1}{150\,000}\right)-\alpha x_1x_2\\ \frac{\mathrm{d}x_2}{dt} &= f_2(x_1,x_2) = 0.08x_2\left(1-\frac{x_2}{400\,000}\right)-\alpha x_1x_2\end{aligned}\tag{17}$$

在状态空间 $x_1\geqslant 0$，$x_2\geqslant 0$，其中 x_1 表示蓝鲸种群，x_2 表示长须鲸种群．为进行模拟，我们将其转化为在同一个状态空间中的差分方程组

218

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= f_1(x_1,x_2)\Delta t\\ \Delta x_2 &= f_2(x_1,x_2)\Delta t\end{aligned}\tag{18}$$

例如，Δx_1 表示在经过 Δt 年后蓝鲸种群的变化量．开始假设 $\alpha=10^{-8}$，后面我们将对 α 做灵敏性分析．我们的目标是确定离散时间动态系统(18)解的性质，并将其与我们已知的连续时间模型(17)解的性质进行比较．

在第四步我们对几个不同的 $h=\Delta t$ 的值运用欧拉方法的计算机程序模拟系统(17)求解．与例题 6.2 一样假设 $x_1(0)=5\,000$，$x_2(0)=70\,000$．图 6-27 解释了经过 $N=50$ 次迭代，令时间步长为 $h=1$ 年所得到的模拟结果．在 50 年后长须鲸增长恢复稳定，但还没有完全达到它们的最终平衡态水平．图 6-28 中我们将

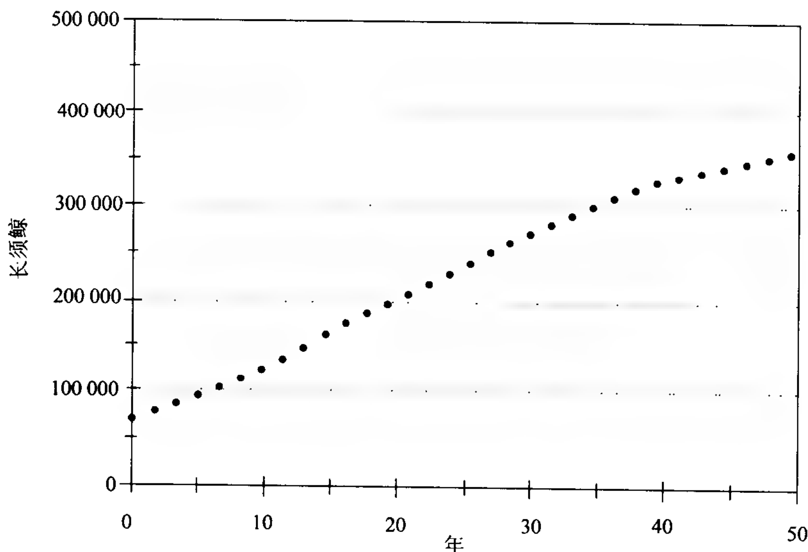


图 6-27　当时间步长 $h=1$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

步长增加到 $h=2$ 年．现在经过 $N=50$ 步迭代后长须鲸种群接近了它的平衡态．用更大的时间步长 h 是一个探究更远的未来的有效方法，但是有趣的事情发生了．图 6-29 显示了采用时间步长 $h=24$ 年的结果．问题的解仍然逼近它的平衡态，

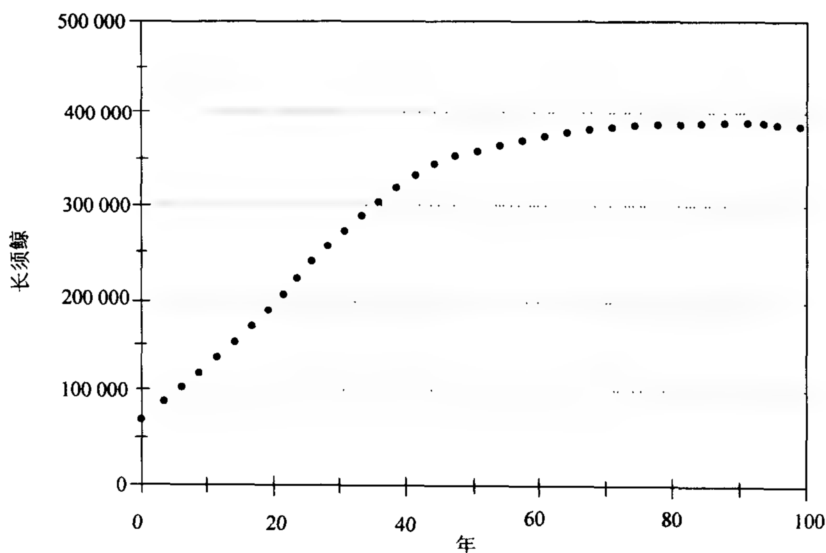


图 6-28 当时间步长 $h=2$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

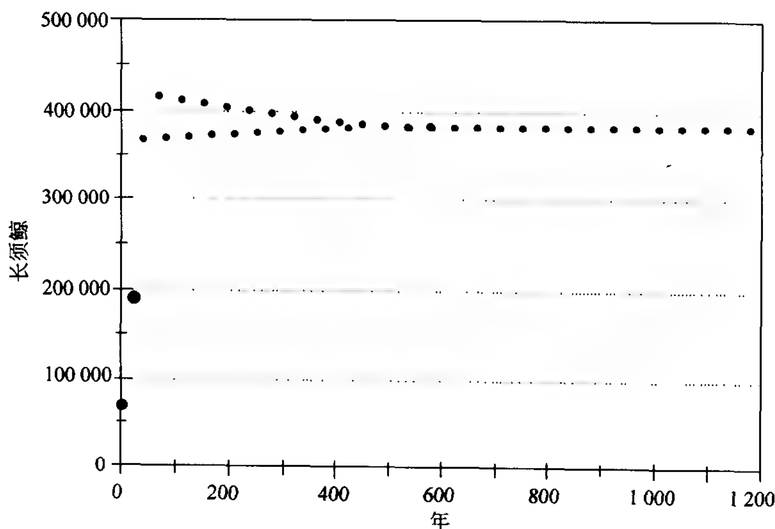


图 6-29 当时间步长 $h=24$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

但是出现了振荡. 图 6-30 显示了采用时间步长 $h=27$ 年所得到的结果. 现在种群实际上偏离了平衡态且最终进入了周期 2 的离散的极限环. 当 $h=32$ 时解最终进入周期 4 极限环，见图 6-31. 图 6-32 展示了当 $h=37$ 时，解显示了混沌行为. 这个效果类似于一个随机数的发生器. 当 $h=40$ 时(没有图示)，解迅速地发散到

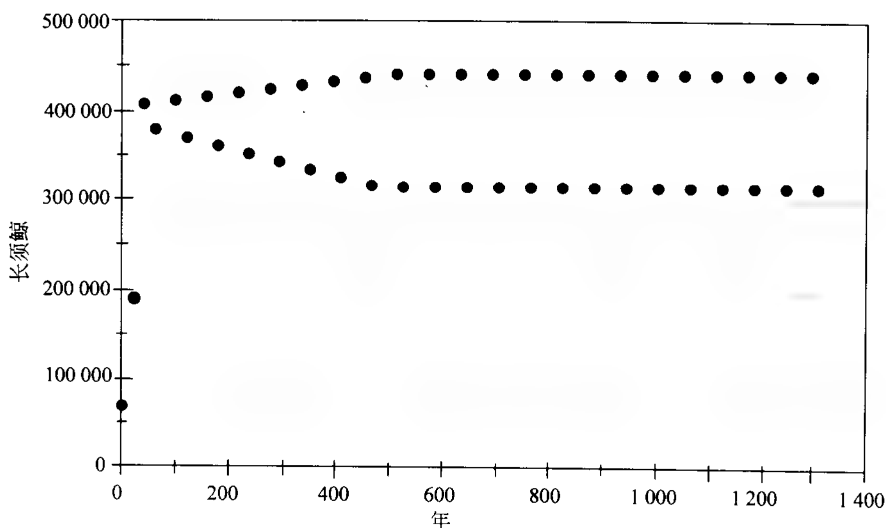


图 6-30 当时间步长 $h=27$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

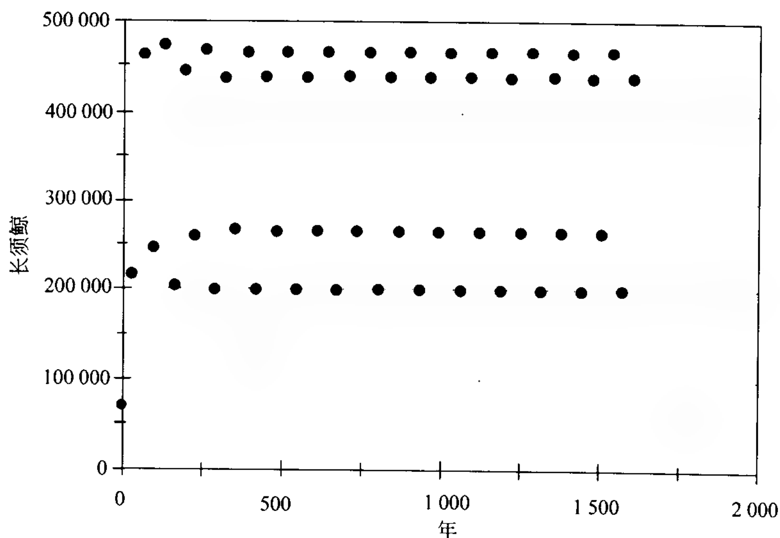


图 6-31 当时间步长 $h=32$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

无穷远. 蓝鲸种群的行为也类似. 不同的初始条件和不同的 α 值也产生类似的结果. 在每一种情况下，当步长 h 增加都出现从稳定到不稳定的变化. 当平衡态变得不稳定时，首先出现振荡，然后是离散的极限环，接着是混沌. 最后，如果 h 太大，解简单地发散.

219

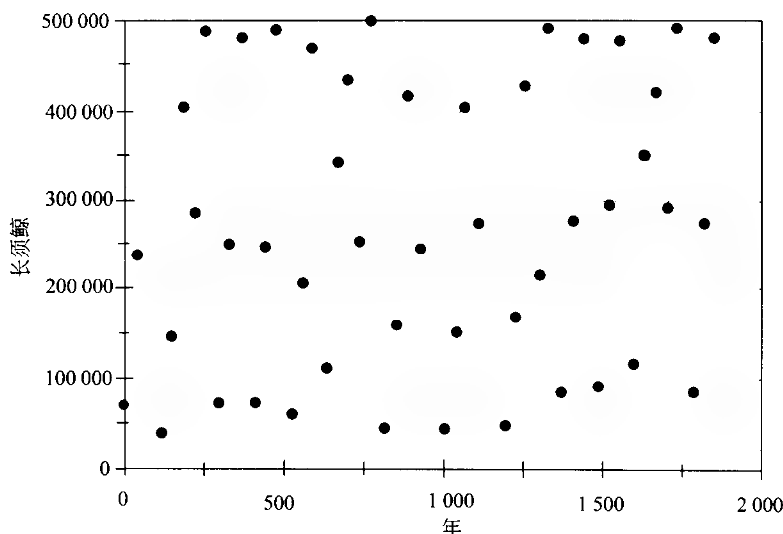


图 6-32　当时间步长 $h=37$ 时对捕鲸问题的离散时间模拟结果：长须鲸 x_2 相对时间 t 变化的图

第五步回答问题. 对连续时间模型的离散逼近是有效的，只要时间步长小到足以保证状态变量在每个时间步上的相对变化率很小即可. 用大的时间步长使我们可以探究更远的未来，但是当时间步长太大时，离散时间系统的行为不再与原来连续时间模型的类似. 在使用较大的时间步长时，观察到离散时间系统的奇怪的行为是有趣的；但是这种行为与我们正尝试模拟的现实情况没有显然的联系.

220

许多种群模型基于 logistic 模型 $x'=rx(1-x/K)$的某种变形. 这些模型的大多数在离散逼近时都呈现出混沌. 当时间步长增加时动态呈现如下典型的变化：从稳定的平衡态到极限环到混沌(然后到不稳定的发散). 在从极限环到混沌的变化时，极限集必然变成分形. 本章末的习题 25 给出一个解释. 关于混沌和分形已有许多书籍和文章. 对大学高年级和研究生初级阶段的学生，[Strogatz, 1994]的书是一本很好的参考书.

混沌从鲸鱼问题的离散逼近中呈现出来是有趣的，但似乎与实际没有什么关系. 说的好听些，它是数学的好奇，说的难听些，它是数值分析中的弊病. 但是，下一个例子表明混沌和分形也会出现在实际的物理模型中.

221

例 6.6　考虑一个从底部加热的空气层. 在常规的情形，上升的热空气与下降的冷空气相互作用形成湍流圈. 运动动态的完整推导构成一个偏微分方程组，

可以用傅立叶变换方法求解；见[Lorenz，1963]．一个简化的表达式包含三个状态变量．x_1 表示对流环旋转的速度，x_2 表示上升与下降气流的温差，x_3 表示对垂直方向上温度轮廓的线性偏离，x_3 为正值说明边界附近温度的变化更快．这个系统的运动方程是

222

$$
\begin{aligned}
x_1' &= f_1(x_1,x_2,x_3) = -\sigma x_1 + \sigma x_2 \\
x_2' &= f_2(x_1,x_2,x_3) = -x_2 + r x_1 - x_1 x_3 \\
x_3' &= f_3(x_1,x_2,x_3) = -b x_3 + x_1 x_2
\end{aligned}
\tag{19}
$$

我们将考虑当 $\sigma=10$，$b=8/3$ 时的实际情况．参数 r 表示空气层底部与顶部的温差，增加 r 将注入更多的能量到这个系统，产生更强的动力．动态方程组(19)被称为劳伦茨方程组，以纪念研究它们的气象学家 E. Lorenz.

为求方程(19)的平衡态，求解三个状态变量的方程组

$$
\begin{aligned}
-\sigma x_1 + \sigma x_2 &= 0 \\
-x_2 + r x_1 - x_1 x_3 &= 0 \\
-b x_3 + x_1 x_2 &= 0
\end{aligned}
$$

223

显然(0，0，0)是一个解．第一个方程隐含着 $x_1=x_2$．带入第二个方程我们得到

$$
\begin{aligned}
-x_1 + r x_1 - x_1 x_3 &= 0 \\
x_1(-1 + r - x_3) &= 0
\end{aligned}
$$

因此，如果 $x_1\neq 0$，则 $x_3=r-1$．于是从第三个方程我们得到 $x_1^2=bx_3=b(r-1)$．如果 $0<r<1$，这个方程没有实根，因此原点是惟一的平衡态．如果 $r=1$，则 $x_3=0$，原点仍是惟一的平衡点．如果 $r>1$，则存在三个平衡点：

$$
\begin{aligned}
E_0 &= (0,0,0) \\
E^+ &= (\sqrt{b(r-1)},\sqrt{b(r-1)},r-1) \\
E^- &= (-\sqrt{b(r-1)},-\sqrt{b(r-1)},r-1).
\end{aligned}
$$

224

做向量场的图形分析是困难的，因为我们现在遇到三维问题．所以我们通过特征值分析来检验这三个平衡态的稳定性．偏导数矩阵是

$$
DF = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r-x_3 & -1 & -x_1 \\ x_2 & x_1 & -b \end{pmatrix}.
$$

在平衡点 $E_0=(0，0，0)$，参数值为 $\sigma=10$，$b=8/3$，这个矩阵变为

$$
A = \begin{pmatrix} -10 & 10 & 0 \\ r & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{pmatrix}
$$

225

对任意的 $r>0$ 它具有三个实特征值

$$
\lambda_1 = \frac{-11-\sqrt{81+40r}}{2}
$$

$$\lambda_2 = \frac{-11+\sqrt{81+40r}}{2}$$

$$\lambda_3 = \frac{-8}{3}$$

如果 $0<r<1$，则所有这些特征值是负的，因此原点是稳定的平衡态. 如果 $r>1$，则 $\lambda_2>0$，于是原点是不稳定的平衡态.

对其他两个平衡态的分析相当复杂. 幸运的是在 E^+ 和 E^- 上的特征值是相同的. 对任意的 $r>1$ 存在特征值 $\lambda_1<0$，和一对复共轭特征值 $\lambda_2=\alpha+i\beta$，$\lambda_3=\alpha-i\beta$. 当 $1<r<r_0$ 时，实部 α 是负的，当 $r>r_0$ 时实部 α 是正的，$r_0\approx1.35$. 因此，当 $1<r<r_0$ 时，在 E^+ 和 E^- 上有两个稳定的平衡态，而当 $r>r_0$ 时每个平衡态都是不稳定的. 在这两个平衡态附近的解与线性系统 $x'=Ax$ 的解具有非常相似的特性，A 是偏导数 DF 在平衡点的估计值. 线性解的每个分量可以写成形如函数 $e^{\lambda_1 t}$，$e^{\alpha t}\cos(\beta t)$ 和 $e^{\alpha t}\sin(\beta t)$ 项的线性组合. 当 $1<r<r_0$ 时，解曲线旋转地趋向非零平衡态，而当 $r>r_0$ 时解曲线旋转地向外. 最终，当 $r>r_0$ 时，解也不是发散地趋向无穷远，从前面例子 5.4 的非线性 RLC 电流问题我们已经看到这种现象. 计算机模拟结果表明解曲线最终进入极限环. 现在我们将模拟动态系统(19)，以确定解的长期特性. [226]

三个状态变量的欧拉方法使用完全相同于图 6-19 中所示的算法，只是多增加一个状态变量. 算法的计算机程序被用于模拟方程(19)在情形 $\sigma=10$ 和 $b=8/3$ 时的解. 图 6-33 显示了 $r=8$，初始条件 $(x_1, x_2, x_3)=(1, 1, 1)$ 时的模拟结果. 我们画 x_2 关于 x_1 变化的图，是因为这些变量最容易被解释. 我们取 $N=500$ 和

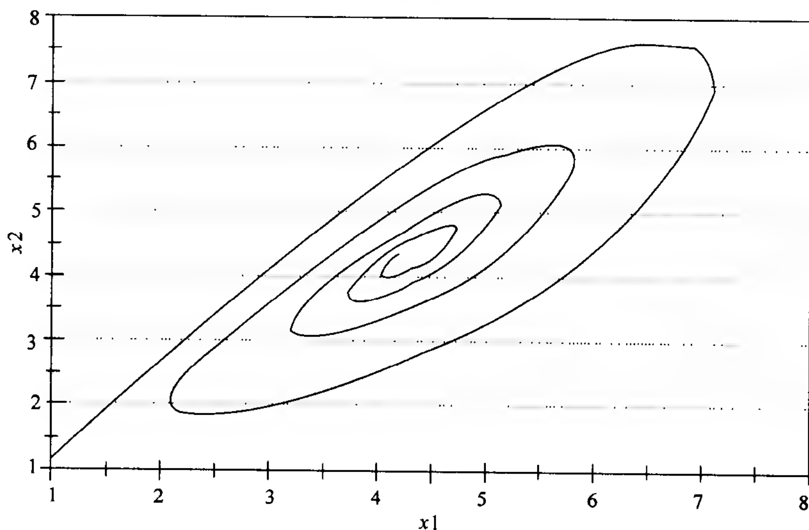


图 6-33 当 $r=8$，初始条件 $(x_1, x_2, x_3)=(1, 1, 1)$ 时，天气问题的温度差 x_2 关于对流率 x_1 变化的图

$T=5$ 使得步长大小为 $h=0.01$. 此外还做了灵敏性分析以确信模拟时间的增加或步长的减小会导致基本相同的图像. 正如我们在早期分析所猜测的那样，解曲线旋转地趋向在 $x_1=x_2=4.32$(且 $x_3=7$)平衡点. 注意到 x_1 表示对流环的旋转速度，x_2 表示上升与下降气流的温差. 当 $r=8$ 时这两个量最终趋向于一个稳定的平衡态. 图 6-34 展示了对情况 $r=8$，初始条件$(x_1, x_2, x_3)=(7, 1, 2)$的模拟结果. 记住这个图实际上是三维图形的投影. 当然实际的解曲线不自交. 那将会破坏解的惟一性. 解再次旋转地趋向平衡态.

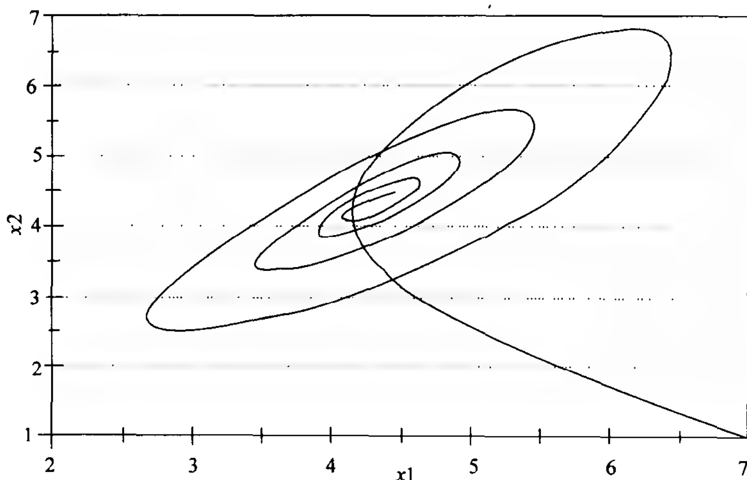


图 6-34 当 $r-8$，初始条件$(x_1, x_2, x_3)-(7, 1, 2)$时，天气问题的温度差 x_2 关于对流率 x_1 变化的图

当我们增加 r 的值，模拟变得对离散方式非常敏感. 图 6-35 展示了对情况 [227] $r=18$，初始条件$(x_1, x_2, x_3)=(6.7, 6.7, 17)$的模拟结果. 我们取 $N=500$ 和 $T=2.5$，于是步长为 $h=0.005$. 解曲线在缓慢的向内盘旋前进的同时绕平衡点 $E^+=(6.733, 6.733, 17)$快速地旋转. 图 6-36 展示了采用 $N=500$ 和 $T=5$，对稍微大的步长 $h=0.01$ 得到的相同模拟的结果. 此时解盘旋向外，离开平衡态. 当然这不是连续时间模型真正会发生的情况；只是我们的模拟方法所导致的不真实的情况. 因为系统处在稳定和不稳定的附近，我们必须小心地对参数 N 和 T 进行灵敏性分析，以保证离散时间系统的行为确实反映了连续时间模型所发生的情况.

最后我们考虑情形 $r>r_0$，此时平衡态都是不稳定的. 图 6-37 显示了采用 $r=28$，初始条件$(x_1, x_2, x_3)=(9, 8, 27)$时的模拟结果. 我们取 $N=500$ 和 $T=10$，于是步长为 $h=0.02$. 经过对参数 N 和 T 的细致的灵敏性分析以证实解曲线的确反映了连续时间模型的性质. 首先解曲线迅速的绕着平衡点 $E^+=(8.485,$

8.485，27)旋转，同时它非常缓慢地螺旋式地向外移动．然后解曲线离开，奔向平衡点 $E^-=(-8.485, -8.485, 27)$，在那它盘旋了一阵，再回头奔向 E^+，采用较大的值 N 和 T 模拟，以证实解从不重复已走过的路线，并且始终保持有界．它继续在 E^+ 周围和 E^- 周围的区域之间穿梭．

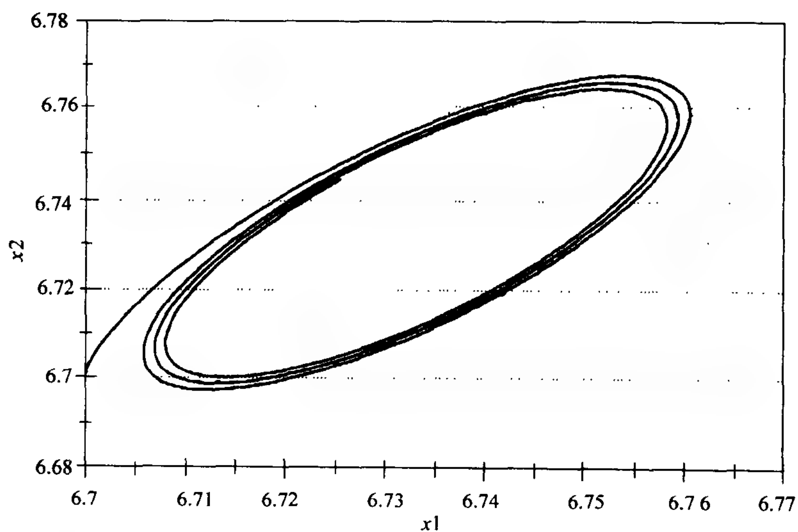


图 6 35　当 $r=18$，初始条件 $(x_1, x_2, x_3)=(6.7, 6.7, 17)$，步长 $h=0.005$ 时，天气问题的温度差 x_2 关于对流率 x_1 变化的图

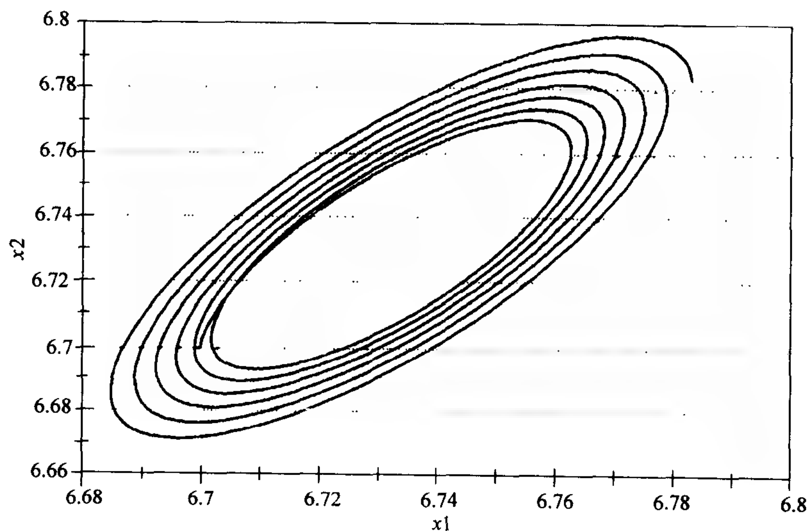


图 6-36　当 $r=18$，初始条件 $(x_1, x_2, x_3)=(6.7, 6.7, 17)$，步长 $h=0.01$ 时，天气问题的温度差 x_2 关于对流率 x_1 变化的图

从附近的初始条件出发的其他解也表现出基本相同的行为．也存在对初始条件的异常的灵敏性．开始非常靠近的解最终相互远离．在图 6-37 中的解在时刻 $t=0$ 从点$(x_1, x_2, x_3)=(9, 8, 27)$出发，到时刻 $t=10$ 处于盘旋在 E^- 周围的状态．而一个附近的解曲线，在时刻 $t=0$ 从点$(x_1, x_2, x_3)=(9.01, 8, 27)$出发，到时刻 $t=10$ 结果盘旋在 E^+ 周围．图 6-38 比较了这两个解的 x_1 坐标经过的

228

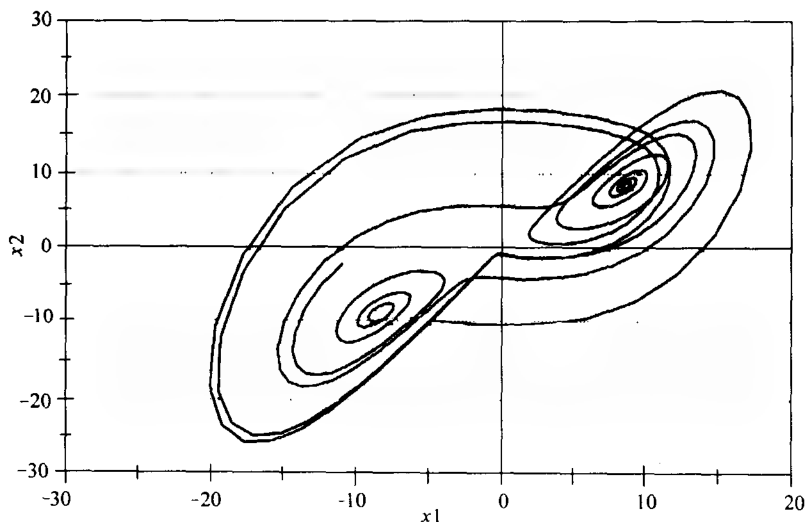


图 6-37　当 $r=28$，初始条件$(x_1, x_2, x_3)=(9, 8, 27)$，天气问题的温度差 x_2 关于对流率 x_1 变化的图

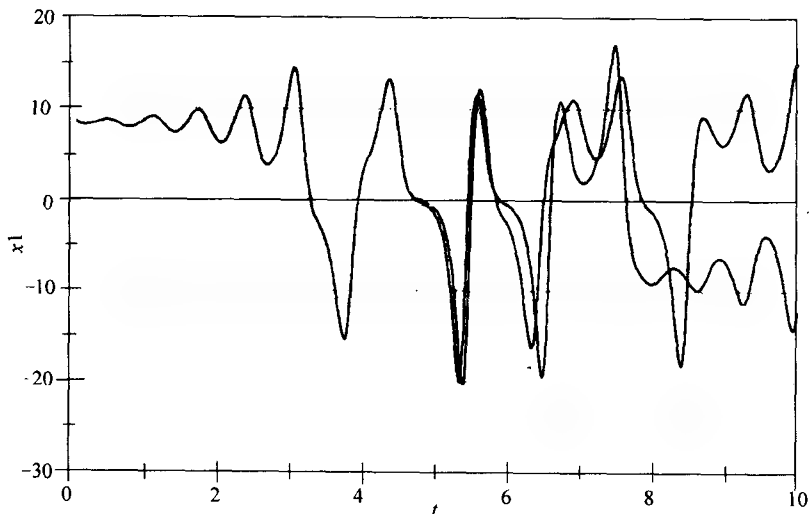


图 6-38　当 $r=28$ 时，天气问题的对流率 x_1 关于时间 t 的变化的图，比较两个初始条件$(x_1, x_2, x_3)=(9, 8, 27)$和$(x_1, x_2, x_3)=(9.01, 8, 27)$

路径. 通过在时刻 $t=10$ 的状态不可能猜想到这两个解是从几乎相同的初始条件出发的. 如果我们取模拟时间 T 越来越大，我们看到这两条解曲线在状态空间有着几乎完全相同的形状. 这个极限集被称为奇怪吸引子. 虽然它是有界的，但它的长度是无穷的，且截面(例如，曲线与平面 $x_3=0$ 相交的点集)是典型的分形. 事实上，处理奇怪吸引子的合理的分析方法是考虑从一个给定相交点到下一个相交点的映射. 这个迭代函数很像为分析例题 6.4 种群增长的 logistic 模型所构造的函数. 按这个超出目前预期范围的研究方式，对离散和连续时间的动态系统的分析发现了新的关联. [229]

6.5　练习

1. 重新考虑例题 6.1 战争问题. 对这个问题我们考虑天气对战争的影响. 坏天气和糟糕的能见度会降低双方直接交火武器的效率. 间接交火武器的效率相对而言不太受天气的影响. 我们可以在模型中表达坏天气的影响如下. 记 w 为坏天气条件导致的武器效率的下降，用 [230]

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= -w\lambda(0.05)x_2-\lambda(0.005)x_1x_2\\ \Delta x_2 &= -w0.05x_1-0.005x_1x_2.\end{aligned}\tag{20}$$

   代替动态系统(3). 这里参数 $0\leqslant w\leqslant 1$ 表示天气条件的变化范围，$w-1$ 表示最好的天气，$w=0$ 表示最糟糕的天气.

   (a)运用计算机实现图 6-2 的算法模拟离散时间动态系统(20)，取 $\lambda=3$. 假设不利的天气引起双方武器效率降低 75%($w=0.25$). 谁将赢得这场战斗，且战斗将进行多长时间？胜利的一方还剩下多少队伍？

   (b)对 $w=0.1$，0.2，0.5，0.75 和 0.9 各种情况重复上面的分析，且将结果列表. 回答(a)中提出的问题.

   (c)哪一方从不利的天气条件中受益？如果你是蓝军指挥官，你希望红军在晴天还是雨天进攻？

   (d)检验你在(a)，(b)和(c)所得到的结论对蓝军相对于红军的武器优势程度依赖的灵敏性. 对 $\lambda=1.5$，2.0，4.0 和 5.0 重复你在(a)和(b)所做的模拟，将结果列表. 重新考虑在你在(c)所做的结论. 它们仍然正确吗？ [231]

2. 重新考虑例题 6.1 战争问题. 对这个问题我们考虑战术对战斗结果的影响. 红军指挥官正在考虑选择五个师中的两个师保留到战斗的第二天或第三天. 你可以做两个独立的实验去模拟偏离基本情况的每种可能. 首先模拟战斗的第一天或前两天，两个蓝军师对抗三个红军师. 然后将模拟得到的结果作为下一步战斗的初始条件，且对红军增加两个师.

   (a)运用计算机实现图 6-2 的算法模拟第一阶段的战斗，在这一阶段两个蓝军师对抗三个红军师. 假设 $\lambda=2$，并将最后力量在两种情形(12 或 24 小时战斗)下列表.

(b)用(a)的结果模拟下一阶段的战斗，红军增加两个师，继续模拟. 对每种情形指出哪边赢得战斗，赢者还剩多少兵力，战斗进行多长时间(两个阶段战斗共进行多少时间).

232

(c)红军指挥官可能选择在第一天就投入全部力量，或者保留两个师一天或两天. 这三个战术哪个较好? 在取得胜利的基础上以损失最少的兵力为最优.

(d)对描述蓝军武器优势程度的参数 λ 进行灵敏性分析. 对 $\lambda=1.0$，1.5，3.0，5.0 和 6.0 重复(a)和(b)，对每个 λ 值确定最优战术. 叙述你关于红军最优战术的一般结果.

3. 重新考虑例题 6.1 战争问题. 对这个问题我们考虑战术核武器对战争的影响. 处在绝望情形，蓝军指挥官考虑实施一次战术核武器打击. 估计到这样一次打击会杀害或重创 70%的红军和 35%的蓝军.

(a)运用计算机实现图 6-2 的算法模拟离散时间动态系统(3)，假设蓝军指挥员下令立刻进行一次核打击. 从初始条件 $x_1=(0.30)5.0$，$x_2=(0.65)2.0$ 开始，取 $\lambda=3$，谁将赢得战斗，战斗将持续多长时间? 赢方还剩下多少师的兵力? 在这种情形下蓝军如何从进行一次核打击中得益?

(b)模拟蓝军指挥员在等待六小时后下达核打击命令的情形. 从 $x_1=5$ 和 $x_2=2$ 开始模拟六小时的战斗. 然后减少双方的队伍数量以反映一次核打击后的结果，再接着模拟. 回答在(a)部分提出的同样的问题.

(c)将(a)和(b)的结果与本章总结的消耗战的情况比较. 讨论由蓝军提议进行的战术核打击的益处. 这样的提议有效吗? 如果有效，指挥员应在何时要求进行核打击?

(d)检验你在(c)部分的结论对蓝军武器优势程度 λ 的灵敏性. 对 $\lambda=1.0$，1.5，3.0，5.0 和 6.0 重复(a)和(b)部分的模拟，回答上面相同的问题.

4. 重新考虑例题 5.2 的空间对接问题. 假设初始接近速度为 50m/s. 加速度为零.

(a)确定对接所需要的时间，假设控制因子为 $k=0.02$. 运用计算机执行在图 6-2 给出的算法模拟离散时间动态系统. 假定当接近的速度的绝对值一直小于 0.1m/s 时对接完成.

233

(b)对 $k=0.01, 0.02, 0.03, \cdots, 0.20$ 各种情况重复(a)部分的模拟，确定每种情况进行对接所需要的时间. 在这些 k 值中哪个导致最短的对接时间.

(c)假设初始接近速度为 25m/s，重复(b)部分的模拟.

(d)假设初始接近速度为 100m/s，重复(b)部分的模拟. 对这个对接过程，关于 k 的最优值你得到什么结论?

5. 重新考虑第 4 章习题 10 引入的疾病传染问题. 运用计算机实现在图 6-2 给出

的算法模拟离散时间动态系统. 回答原习题中从(a)到(d)部分所提的问题.

6. 在第 4 章习题 4 我们为鲸鱼问题引入了一个简化的种群增长模型.

   (a)模拟这个模型，假设现有 5 000 条蓝鲸和 70 000 长须鲸. 假设 $\alpha=10^{-7}$ 且运用 6.2 节简单的模拟技术. 根据这个模型经过长时期两个鲸鱼种群将发生什么变化?

   (b)检验在(a)部分你的结论对现有 5 000 条蓝鲸条件的灵敏性. 分别假设现有 3 000，4 000，6 000，或 7 000 条蓝鲸，重复(a)部分的模拟. 你的结论对海洋中现有准确的蓝鲸数的灵敏程度如何?

   (c)检验在(a)部分你的结论对蓝鲸的内禀增长率每年为 5%的灵敏性. 分别假设每年的增长率为 3，4，6 或 7%，重复(a)部分的模拟. 你的结论对实际的内禀增长率的灵敏程度如何?

   (d)检验在(a)部分你的结论对竞争系数 α 的灵敏性. 分别假设 $\alpha=10^{-9}$，10^{-8}，10^{-6}和 10^{-5}，重复(a)部分的模拟. 你的结论对两个种群之间竞争的强度的灵敏程度如何?

7. 在第 4 章习题 5 鲸鱼问题中我们引入一个复杂的种群增长模型.

   [提示：需要用欧拉方法.]

   (a)模拟这个模型，假设现有 5 000 条蓝鲸和 70 000 长须鲸. 假设 $\alpha=10^{-7}$ 且运用 6.2 节简单的模拟技术. 根据这个模型经过长时期两个鲸鱼种群将发生什么变化? 两个鲸鱼种群是否能够恢复，或者一个或两个种群将灭亡? 这需要多长时间?　234

   (b)检验在(a)部分你的结论对现有 5 000 条蓝鲸条件的灵敏性. 分别假设现有 3 000，4 000，6 000，8 000 或 10 000 条蓝鲸，重复(a)部分的模拟. 你的结论对海洋中现有准确的蓝鲸数的敏感程度如何?

   (c)检验在(a)部分你的结论对蓝鲸的内禀增长率每年为 5%的灵敏性. 分别假设每年的增长率为 3，4，6 或 7%，重复(a)部分的模拟. 你的结论对实际的内禀增长率的敏感程度如何?

   (d)检验在(a)部分你的结论对假设最小的有效的蓝鲸种群水平是 3 000 条的灵敏性. 分别假设实际水平是 1 000，2 000，4 000，5 000 或 6 000 条，重复(a)部分的模拟. 你的结论对蓝鲸的实际的最小的有效种群数的灵敏程度如何?

8. 重新考虑第 4 章习题 6，假设 $\alpha=10^{-8}$，现有种群数 $B=5\ 000$ 和 $F=70\ 000$.

   (a)用计算机实现在 6.2 节运用的简单算法确定捕捞的影响. 假设 $E=3\ 000$ 船天/年. 根据这个模型经过长时期两个鲸鱼种群将发生什么变化? 两个鲸鱼种群是否能够恢复，或者一个或两个种群将灭亡? 这需要多长时间?

   (b)假设 $E=6\ 000$ 船天/年，重复(a)部分的模拟.

   (c)E 在什么范围内能够使得两个鲸鱼种群数逼近非零的平衡态?

   (d)分别对 $\alpha=10^{-9}$，10^{-8}，10^{-6}和 10^{-5}，重复(c)部分的模拟，并将结果列

表. 讨论你的结果对两个种群之间的竞争程度的灵敏性.

9. 重新考虑第 4 章习题 6 的鲸鱼问题. 对这个问题我们探讨经济利益驱动导致一类鲸鱼种群灭绝. 假设现有 5 000 条蓝鲸和 70 000 长须鲸.
   (a)假设 $E=3\,000$ 船天/年，模拟这个模型. 运用 6.2 节简单的模拟技巧，且假设 $\alpha=10^{-7}$. 确定长期的每年以蓝鲸为单位的捕获量(2 条长须鲸＝1 条蓝鲸单位).
   (b)确定捕捞的力度使得长期的以蓝鲸为单位计算的捕获率最大. 分别模拟当 $E=500$，1 000，1 500，…，7 500 船天/年的情况. 哪种情形可以导致最高的可实现的产量？

235

   (c)假设按使得长期的以蓝鲸为单位的捕获率最大的捕捞力度捕捞. 根据这个模型经过长期捕捞后这两个种群将会发生什么变化？两个种群都会恢复，或一个或两个种群都灭亡？这些将在多久以后发生？
   (d)某些经济学家争辩说捕鲸人为了鲸鱼行业将会维持长期的可持续的最大产量. 如果这样，连续捕捞是否会导致一个或两个鲸鱼种群的灭绝.

10. (继续习题 9)某些经济学家争辩说捕鲸人将会为整个捕鲸行业获得最大的税收补贴确定捕捞计划. 假设捕捞产生税金是每蓝鲸单位为 10 000 美元，并且税收减免率为 10%. 如果在第 i 年税金为 R_i，整个税金补贴为

$$R_0+\lambda R_1+\lambda^2 R_2+\lambda^3 R_3+\cdots,$$

   其中 λ 表示补贴率(此题取 $\lambda=0.9$)
   (a)假设 $E=3\,000$ 船天/年，模拟这个模型. 运用 6.2 节简单的模拟技巧，且假设 $\alpha=10^{-7}$. 确定此时的整体税收补贴.
   (b)确定使得整体税收补贴最大的捕捞计划. 分别模拟各种情况 $E=500$，1 000,1 500，…，7 500 船天/年. 哪种情况使整体税金补贴值最大？
   (c)假设鲸鱼捕捞量使得整体税收补贴最大. 根据这个模型经过长期捕捞后这两个种群将会发生什么变化？两个种群都会恢复，或一个或两个种群都灭亡？这些将在多久以后发生？
   (d)对反映两个种群之间的竞争程度参数 α 进行灵敏性分析. 分别考虑 $\alpha=10^{-9}$，10^{-8}，10^{-6} 和 10^{-5}，并将结果列表. 讨论你的结果对两个种群之间的竞争程度的灵敏性.

11. 重新考虑第 4 章习题 7 的捕食—被捕食模型
   (a)通过模拟确定鲸鱼和磷虾的平衡态. 运用 6.2 节简单的模拟技巧，从几个不同的初值开始，一直运行到两个种群水平达到稳定状态.
   (b)在两个种群水平达到稳定状态后，假设一场生态灾害杀害了 20%的鲸鱼和 80%的磷虾. 描述两个种群将发生什么变化，且这种变化需要经历多长时间.
   (c)假设捕捞使得鲸鱼只剩下它的平衡态的 5%. 而磷虾保持平衡态的数量.

描述一旦停止捕捞将发生什么情况. 鲸鱼恢复需要多长时间? 磷虾群体将发生什么变化?

236

(d)检验你在(c)部分的结论对鲸鱼剩余量 5%假设的灵敏性. 分别模拟当只剩下 1%, 3%, 7%和 10%时的情况, 且将你的结果列表. 鲸鱼种群恢复所需的时间对它受损害的程度的灵敏性如何?

12. 重新考虑例题 5.1 的树木问题.

(a)确定硬材树和软材树增长到它们的稳定的平衡态的 90%所需的时间. 假设初始种群为软材树 1 500 吨/英亩, 硬材树 100 吨/英亩. 正是在这种情况我们打算引入一种新的更有价值的树种到这个现存的生态系统. 假设 $b_i = a_i/2$, 并运用 6.2 节简单的模拟技巧.

(b)确定硬材树的生物量处于增长速度最快的点.

(c)假设硬材树每吨价格是软材数的 4 倍, 确定森林价值(美元/英亩)增长速度最快的点.

13. (继续考虑习题 12)皆伐就是将森林的所有树同时砍光然后重新植树.

(a)确定最优的森林收获策略, 即确定在多少年后将树砍光重新植树. 假设重新种上硬材树 100 吨/英亩和软材树 100 吨/英亩. 你须回答每年每英亩生长多少价值的美元.

(b)假设只种植硬材树(200 吨/英亩), 确定最优的森林收获策略.

(c)重新讨论(b), 但现在假设只种植软材树(200 吨/英亩).

(d)给森林管理员解释最优的皆伐策略. 在什么情况下你会考虑卖土地而不是重新种植树.

14. 重新考虑第 4 章习题 5 更复杂的种群竞争模型. 假设 $\alpha = 10^{-7}$

(a)运用欧拉方法的计算机程序模拟这个模型的行为, 从初始条件 $x_1 = 5\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2 = 70\ 000$ 条长须鲸开始. 向课文一样, 对 N 和 T 进行灵敏性分析以保证你的结果的有效性. 根据这个模型在长时间以后这两个种群将发生什么变化? 这两个种群都会恢复, 或一个或两个种群都灭亡? 这些将在多久以后发生?

237

(b)对初始条件中蓝鲸和长须鲸的某个数量范围重复(a)的讨论. 将你的结果列表, 并对每种情况回答(a)部分提出的相同的问题.

(c)利用(a)和(b)的结果给出这个系统的完整的相图.

(d)确定相图中的区域, 在这个区域中一个或两个种群都注定灭亡.

15. 重新考虑例题 6.3 的 RLC 电路问题, 对表示电感的参数 L 进行灵敏性分析.

(a)将动态系统模型(8)推广到一般情形 $L > 0$. 这个模型的向量场如何随 L 变化?

(b)确定在原点邻域内逼近非线性 RLC 电路行为的线性系统. 计算线性系统的特征值, 它是 L 的函数. 确定 L 的取值范围, 使得两个特征值是具有

正实部的复数，就像 $L=1$ 的情况一样.

(c)分别对各种情况 $L=0.5$，0.75，1.5 和 2.0，运用欧拉方法的计算机程序模拟 RLC 电路行为. 使用同样的如图 6-21 的初始条件 $x_1=0.1$，$x_2=0.3$. 像课文一样，对每一种情况进行关于 T 和 N 的灵敏性分析以保证你的结果的有效性.

(d)对(c)中提出的每个 L 值模拟若干个初始条件，对每种情况画出完整的相图. 描述这些相图是如何随着电感 L 的变化而变化的.

16. 重新考虑例题 6.3 的 RLC 电路问题，现在考虑当电容 $C>4$ 时将会发生什么情况.

(a)对 $C>4$ 的情况利用特征值和特征向量方法求解线性系统(10).

(b)画出这个线性系统的相图. 相图如何作为 C 的函数而变化?

(c)分别对各种情况 $C=5$，6，8 和 10，运用欧拉方法的计算机程序模拟 RLC 电路. 使用像图 6-21 一样的初始条件 $x_1=0.1$，$x_2=0.3$. 像课文一样，对每种情况进行关于 N 和 T 的灵敏性分析以保证你的结果的有效性.

(d)对(c)中提出的每个 C 值模拟若干个初始条件，对每种情况画出完整的相图. 与课文中所讨论的 $0<C<4$ 的情形对比. 当我们在这两种情形之间变化时，在相图中出现了什么变化?

[238] 17. 重新考虑例题 6.3 的 RLC 电路问题，现在考虑我们的一般结论关于电阻假设的稳健性，在这个 RLC 电路中假设电阻具有 $v-i$ 特征 $f(x)=x^3-x$. 此处我们假设 $f(x)=x^3-ax$，其中参数 a 表示正实数. ($a=-4$ 是例题 5.3 的选择.)

(a)推广动态系统模型(8)到一般情形 $a>0$. 这个模型的向量场如何随 a 变化?

(b)确定在原点邻域内逼近非线性 RLC 电路行为的线性系统. 计算线性系统的特征值，它是 a 的函数.

(c)画出这个线性系统的相图. 相图如何作为 a 的函数而变化?

(d)分别对各种情况 $a=0.5$，0.75，1.5 和 2.0，运用欧拉方法的计算机程序模拟 RLC 电路，并对每种情况画出完整的相图. 当我们改变 a 时相图将发生什么变化? 关于这个模型的稳健性你的结论是什么?

18. 重新考虑例题 6.3 的 RLC 电路问题，现在考虑我们的一般结论关于电阻假设的鲁棒性，在这个 RLC 电路中假设电阻具有 $v-i$ 特征 $f(x)=x^{2+b}-x$. 其中 $b>0$.

(a)推广动态系统模型(8)到一般情形 $b>0$. 这个模型的向量场如何随 b 变化?

(b)确定在原点邻域内逼近非线性 RLC 电路行为的线性系统. 计算线性系统的特征值，它是 b 的函数.

(c)画出这个线性系统的相图. 相图如何作为 b 的函数而变化?

(d)分别对各种情况 $b=0.5$, 0.75, 1.25 和 1.5, 运用欧拉方法的计算机程序模拟 RLC 电路, 并对每种情况画出完整的相图. 当我们改变 b 时相图将发生什么变化? 关于这个模型的稳健性你的结论是什么?

19. 一个钟摆由一个系在 120 厘米长的轻棍棒的一端上的 100 克重物构成. 棍棒的另一端固定, 且可以自由地摆动. 作用在这个运动的钟摆上的摩擦力被认为大致正比于它的角速度.

(a)钟摆被抬高到使棍棒与垂直方向呈 45°角的位置. 然后放开钟摆. 确定钟摆后来的运动. 运用 5 步方法, 并建一个连续时间的动态系统. 运用欧拉方法模拟. 假设摩擦力大小为 $k\theta'$, 其中 θ' 是角速度, 弧度/秒, 摩擦系数 $k=0.05$ 克/秒.

239

(b)用线性逼近的方法确定在平衡态附近这个系统的行为. 假设摩擦力大小为 $k\theta'$, 局部的行为如何依赖 k?

(c)确定钟摆的周期. 周期是如何随 k 变化的?

(d)这样大小的钟摆被用作为古老时钟的一部分机械装置. 为了保持摆动的确定周期, 使用了一个周期外力. 为了使摆幅达到 ±30°这个外力应该多大? 外力的周期是多少? 这个答案是如何依赖所要求的摆幅? [提示: 模拟钟摆振荡的一个周期, 变化初始角速度以获得周期性质.]

20. (混沌)这个问题解释了连续时间和离散时间动态系统的显著差别, 这个差别甚至会出现在简单模型中.

(a)证明对任意的 $a>1$, 连续时间动态系统

$$x_1' = (a-1)x_1 - ax_1^2$$

$$x_2' = x_1 - x_2$$

有一个稳定的平衡态 $x_1=x_2=(a-1)/a$.

(b)证明对任意的 $a>1$ 类推的离散时间动态系统

$$\Delta x_1 = (a-1)x_1 - ax_1^2$$

$$\Delta x_2 = x_1 - x_2$$

也有一个平衡态 $x_1=x_2=(a-1)/a$.

(c)对离散时间动态系统运用模拟的方法探讨平衡态 $x_1=x_2=(a-1)/a$ 的稳定性和它附近的解的性质. 对每种情况 $a=1.5$, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 和 4.0, 分别取平衡态附近的不同的初值进行模拟并介绍你所看到的事实. [提示: $a=4.0$ 表现了一个简单的混沌模型, 一个确定性模型的显然的随机行为.]

21. (程序练习)另一个可以运用于模拟动态系统的计算方法是龙格库塔方法. 图 6-39 给出了一个用龙格库塔方法模拟具有两个变量的动态系统

240

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2)$$

$$\frac{dx_2}{dt}=f_1(x_1,x_2).$$

的计算方法. 对合理的步长大小 h，龙格库塔方法具有性质，对双倍的步数(一半的 h)会产生 16 倍的精度.

```
算法：  龙格-库塔方法
变量：t(n)=n 步后的时间
      x1(n)=在时刻 t(n)的第 1 状态变量
      x2(n)=在时刻 t(n)的第 2 状态变量
      N=步数
      T=模拟时间
输入：t(0), x1(0), x2(0), N, T
过程：Begin
      h←(T-t(0))/N
      for n=0 to N-1 do
        Begin
        r1←f1(x1(n), x2(n))
        s1←f2(x1(n), x2(n))
        r2←f1(x1(n)+(h/2)r1, x2(n)+(h/2)s1)
        s2←f2(x1(n)+(h/2)r1, x2(n)+(h/2)s1)
        r3←f1(x1(n)+(h/2)r2, x2(n)+(h/2)s2)
        s3←f2(x1(n)+(h/2)r2, x2(n)+(h/2)s2)
        r4←f1(x1(n)+hr3, x2(n)+hs3)
        s4←f2(x1(n)+hr3, x2(n)+hs3)
        x1(n+1)←x1(n)+(h/6)(r1+2r2+2r3+r4)
        x2(n+1)←x2(n)+(h/6)(s1+2s2+2s3+s4)
        t(n+1)←t(n)+h
        End
      End
输出：t(1), …, t(N)
      x1(1), …, x1(N)
      x2(1), …, x2(N)
```

241

图 6-39　龙格-库塔方法的伪代码

(a)在计算机上实现龙格-库塔方法.

(b)检验你的计算程序，通过应用它解第 5 章的线性系统(18). 对情况 $c_1=1$，$c_2=0$，将你的结果与(19)式的解析解比较.

(c)检验对例题 6.3 的 RLC 电路问题图 6-20 和图 6-21 得到的结果.

22. 重新考虑例题 6.4 的鲸鱼问题. 在这个问题中我们将探讨蓝鲸种群的性质. 假设 $\alpha=10^{-8}$. 从 $x_1=5\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2=70\ 000$ 条长须鲸开始.

(a)对 $h=\Delta t=1$ 年运用欧拉方法，模拟 $N=50$ 次，描述蓝鲸种群随时间的行为.

(b)分别对每种情形 $h=5$，10，20，30，35，40，取 $N=50$，重复(a)部分所做的模拟. 蓝鲸种群的性质随着时间步长的增加如何变化?

(c)对 $\alpha=10^{-7}$ 和 $\alpha=10^{-9}$ 重复(b)部分所做的模拟. 你在(b)部分的结论对 $\alpha=10^{-8}$ 假设的灵敏性如何?

(d)从初始条件 $x_1=150\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2=400\ 000$ 条长须鲸开始，假设 $\alpha=10^{-8}$ 重复在(b)部分所做的模拟. 你在(b)部分的结论对初始条件 $x_1=5\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2=70\ 000$ 条长须鲸的假设的灵敏性如何?

23. 重新考虑例题 6.4 的鲸鱼问题. 在这个问题中我们将探讨一个混沌动态系统对初值条件的灵敏性. 假设 $\alpha=10^{-8}$，从 $x_2(0)=70\ 000$ 条长须鲸开始.

(a)对 $h=\Delta t=35$ 年运用欧拉方法，通过模拟确定在 $T=1\ 750$ 年($N=50$)以后蓝鲸的数量 $x_1(T)$，采用初始条件 $x_1(0)=5\ 000$ 条蓝鲸.

(b)采用初始条件 $x_1(0)=5\ 050$ 条蓝鲸，重复在(a)所做的模拟，以确定在 $T=1\ 750$ 年以后蓝鲸的数量 $x_1(T)$. 与(a)的结果比较，并计算最终的种群数对初始条件的灵敏性，注意，初始条件的相对变化率是 $\Delta x_1(0)/x_1(0)=0.01$，最终种群数的变化率是 $\Delta x_1(T)/x_1(T)$.

(c)分别对每个初始条件 $x_1=5\ 005$，5 000.5，5 000.05，5 000.005 重复(b)部分所做的模拟，并且评论灵敏性与初始条件变化 $\Delta x_1(0)$ 的关系.

(d)这个动态系统对初值条件微小变化的灵敏性如何? 如果估计了这样的系统的目前状态，我们是否能确信地预言它的将来? 242

24. 重新考虑例题 6.4 的捕鲸问题. 在这个问题中我们将探讨在方程(18)的离散逼近中当步长 $h=\Delta t$ 增加时，从稳定到不稳定的变化. 假设 $\alpha=10^{-8}$.

(a)计算连续时间模型(17)的平衡态在第一象限内的坐标. 运用对连续时间动态系统的特征值检验证明这个平衡态是稳定的.

(b)解释为什么离散逼近的迭代函数是 $G(x)=x+hF(x)$，其中 $h=\Delta t$. 写出方程(18)的离散时间动态系统的迭代函数.

(c)写出在(a)部分确定的平衡点的偏导数矩阵 $A=DG$，并计算这个矩阵的特征值. 它是步长 h 的函数.

(d)利用对离散时间动态系统的特征值检验，确定使得在(a)部分确定的平衡态在离散逼近过程中保持稳定的最大的步长 h.

25. 重新考虑例题 6.4 的捕鲸问题. 在这个问题中我们将应用模拟的方法探讨在方程(18)取不同步长 $h=\Delta t$ 的离散逼近时的分形极限集.

(a)用欧拉算法的计算程序重新实现课文中的图 6-31. 假设 $\alpha=10^{-8}$，取步长 $h=\Delta t=32$ 年，初始条件 $x_1(0)=5\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2(0)=70\ 000$ 条长须鲸.

(b)画出长须鲸 $x_2(n)$ 关于蓝鲸 $x_1(n)$ 变化的图，$n=100$，…，1 000. 你的图应该展示出由四点构成的极限集.

(c)对步长 $h=33$，34，…，37，重复(a)部分所做的模拟. 对每种情况画出(b)部分所做的极限集. 这些极限集随着步长的增加如何变化?

(d)对初始条件 $x_1(0)=150\ 000$ 条蓝鲸和 $x_2(0)=400\ 000$ 条长须鲸重复(c)部分所做的分析. 极限集是否依赖初始条件?

(e)对 $\alpha=3\times10^{-8}$ 重复(c)部分所做的分析. 极限集是否依赖竞争参数 α?

26. 重新考虑例题 6.6 的天气问题.

243

(a)用欧拉算法的计算程序重新实现课文中的图 6-33. 假设 $\sigma=10$，$b=8/3$，$r=8$，初始条件为 $(x_1, x_2, x_3)=(1, 1, 1)$.

(b)利用(a)部分得到的结果画出温度轮廓主线的偏离 x_3 相对于环流旋转率 x_1 变化的图. 对步长进行灵敏性分析以保证你画的图确实反映了连续时间动态系统的行为.

(c)对初始条件 $(x_1, x_2, x_3)=(7, 1, 2)$ 重复(b)部分所做的模拟. 解曲线是否逼近在课文中确定的平衡态?

(d)对 $r=18$ 和 $r=28$ 重复(b)部分所做的模拟. 当 r 增加时解的行为如何变化?

27. 重新考虑例题 6.6 的天气问题.

(a)用欧拉算法的计算程序重新实现图 6-35，取 $N=500$ 和 $T=2.5$(步长 $h=0.005$). 假设 $\sigma=10$，$b=8/3$，$r=18$，初始条件为 $(x_1, x_2, x_3)=(6.7, 6.7, 17)$.

(b)对较大的步长 $h=0.01$，0.015，…，0.03 重复(a)部分所做的模拟. 你可以保持 $N=500$，增加 $T=5$，7.5，10，12.5，15. 当步长增加时模拟的解曲线如何变化?

(c)当 $\sigma=10$，$b=8/3$，$r=24$ 时，求平衡态 E^+ 的坐标. 通过模拟证实. 也就是以 E^+ 为初始条件做模拟，验证解将留在这点.

(d)在(c)部分找到的平衡态 E^+ 是稳定的吗? 通过模拟证实. 也就是从初始条件 $E^+ + (0.1, 0.1, 0)$ 开始模拟，以确定解是否趋向平衡态 E^+. 必须用多么小的步长以保证模拟的结果确实反映了连续时间动态系统的行为?

6.6 进一步的阅读文献

Acton, F. (1970). *Numerical Methods That Work*, Harper & Row, New York.

Brams, S., Davis, M., and Straffin, P. *The Geometry of the Arms Race*, UMAP module 311.

Dahlquist, G., and Bjorck, A. *Numerical Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Gearhart, W., and Martelli, M. *A Blood Cell Population Model, Dynamical Diseases, and Chaos*, UMAP module 709.

Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a New Science*, R.R. Donnelley, Harrisonburg, VA.

Lorenz, E. (1963). Deterministic non-periodic flow, *Journal of Atmospheric Science* 20, 130–141.

Press, W., Flannery, B., Teukolsky, S., and Vetterling, W. (1987). *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, New York.

Smith, H. *Nuclear Deterrence*, UMAP module 327.

Strogatz, S. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, Addison–Wesley, Reading, MA.

Zinnes, D., Gillespie, J., and Tahim, G. *The Richardson Arms Race Model*, UMAP module 308.

244 ~ 245

第三部分　概率模型

许多现实生活问题包含有不确定性的元素．在某些模型中，我们可以引入随机变量描述人类行为的不确定性．在另外的模型中，我们或者不能确定系统中确切的物理参数，或者不能确定控制一个系统动态特性的准确的物理规律．这时我们可以像量子力学那样认为物理参数和物理规律实质上是随机的．有时把概率引入模型当中会带来简便，有时是必须的．在这两种情况下进入概率论的领域使得数学建模显得更加重要和有用．

246
～
247

第 7 章 概率模型简介

概率是一个常见的和直观的概念．在这一章我们开始关于概率模型的讨论．不像正规的概率论那样先介绍一些背景知识，我们将以很自然的方式引入在实际问题的研究中出现的概率论的基本概念．

7.1 离散概率模型简介

许多简单的且直观的概率模型都包含有离散的可能结果的集合，同时没有随时间变化的元素．这样的模型在现实世界中经常遇到．

例 7.1 一个电子器件工厂生产一种二极管．质量控制工程师负责保证在产品出厂前检测出次品的二极管．估计这个厂生产的二极管有 0.3%是次品．可以对每个二极管逐个进行检验，也可以把若干二极管串联起来成组进行检验．如果检验通不过，也就是说其中定有一个或几个二极管是次品．已知检验一个单个的二极管的花费是 5 分钱，检验一组 $n>1$ 个二极管的花费是 $4+n$ 分钱．如果成组检验没有通过，则这一组的每一个二极管必须逐个重新检验以便于找出这些次品．要求寻求检测次品二极管的质量控制的步骤使得用于检验的花费最少．

我们将使用五步法．图 7-1 综述了第一步的结果．变量 n 是决策变量，同时随便选取 $n=1, 2, 3, \cdots$，变量 C 是我们所选择的质量控制步骤的随机的结果．C 是一个随机变量．然而量 A 不是随机的．它表示随机变量 C/n 的平均或期望值．

248～249

变量：

n＝每个检验组内二极管的数目

C＝一组元件的检验费用（分）

A＝平均检验费用（分/二极管）

假设：

如果 $n=1$，则 $A=5$ 分

否则（$n>1$），我们有，分组检验结果全部二极管都是好的，则 $C=4+n$

如果检验结果有次品，则 $C=(4+n)+5n$

A＝（C 的平均值）/n

目标：求 n 的数值，使 A 最小

图 7-1 关于二极管问题第一步的结果

第二步是选择建模的方法．我们将使用离散的概率模型．

考虑随机一个变量 X，它可以取一个离散数值集合中的任何一个数值

$$X \in \{x_1, x_2, x_3, \cdots\},$$

同时假设 $X=x_i$ 的概率是 p_i. 我们记为

$$\Pr\{X = x_i\} = p_i$$

显然这时有

$$\Sigma p_i = 1$$

因为 X 以概率 p_i 取数值 x_i，所以 X 的平均或期望值一定是所有可能的 x_i 的加权平均，权值就是相应的概率值 p_i. 可以写为

$$EX = \Sigma x_i p_i \tag{1}$$

这一组概率值$\{p_i\}$表明了随机变量 X 的分布.

例 7.2　在一个简单的掷骰子的游戏中，同时投掷两个骰子，庄家将按照两个骰子所示的点数付给你同等面值的美元数. 要付多少钱你才愿意玩这个游戏?

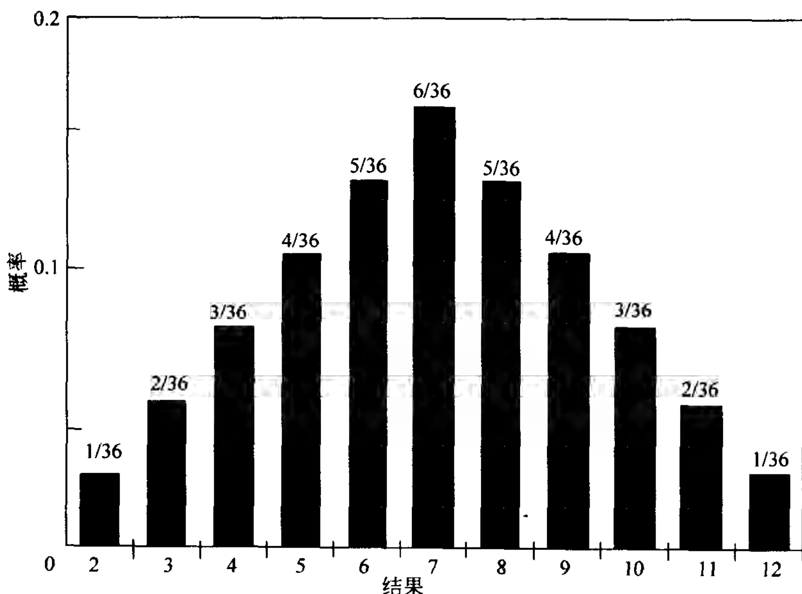
用 X 表示骰子所示的点数. 一共有 $6\times6=36$ 种可能的结果，每种结果出现的可能性是相同的. 这里只有一种方式投出 2 点，因此有

$$\Pr\{X = 2\} = \frac{1}{36}.$$

有两种方式投出 3 点(1 和 2 或 2 和 1)，所以有

$$\Pr\{X - 3\} = \frac{2}{36}.$$

250　图 7-2 描绘了 X 的全部概率的分布.



251　图 7-2　两个骰子点数之和的结果及其概率分布的直方图

X 的期望值是

$$EX = 2\left(\frac{1}{36}\right)+3\left(\frac{2}{36}\right)+\cdots+12\left(\frac{1}{36}\right),$$

或 $EX=7$. 多次重复这个游戏你将期望每一次赢得 7 元. 因此如果你每一次游戏所付的费用不超过 7 元，它是值得去玩的.

更加特别的是，假设你一次又一次玩这个游戏. 用 X_n 表示第 n 次投掷所赢得的总数. 每个 X_n 有相同的分布，同时不同 X_n 的是独立的，也就是说每一次投掷所赢的钱数不依赖于前面投掷所赢的钱数. 有一个定理，称之为“强大数定律”：对于任意的独立、同分布随机变量的序列 X_1，X_2，X_3，…，具有有限的 EX，我们有

$$\frac{X_1+\cdots+X_n}{n}\to EX \tag{2}$$

当 $n\to\infty$ 时以概率 1 成立. 换句话说，如果你长时间地玩这个游戏，你实际上确实可以实现每次赢得 7 美元. [Ross，1985，p. 70].

关于独立性的正式的定义如下：令 Y，Z 表示两个随机变量

$$Y\in\{y_1,y_2,y_3,\cdots\}$$

和

$$Z\in\{z_1,z_2,z_3,\cdots\}.$$

我们说 Y 和 Z 是独立的，如果

$$\Pr\{Y=y_i,Z=z_j\}=\Pr\{Y=y_i\}\Pr\{Z=z_j\}. \tag{3}$$

一般说来是真的. 例如，用 Y 和 Z 分别表示第一个和第二个骰子出现的点数. 则

$$\Pr\{Y=2,Z=1\}=\Pr\{Y=2\}\Pr\{Z=1\}=\left(\frac{1}{6}\right)\left(\frac{1}{6}\right)=\left(\frac{1}{36}\right),$$

对于每一个可能的结果都是一样. 随机变量 Y 和 Z 是独立的. 第二个骰子出现的点数与第一个骰子出现的点数没有关系.

再回到例 7.1 的二极管的问题. 我们看到，对于任何的 $n>1$，随机变量 C 取两个可能数值中的一个：如果所有的二极管都是好的，则

252

$$C=4+n.$$

否则

$$C=(4+n)+5n,$$

因为我们必须重新检验每一个二极管. 用 p 表示所有的二极管都是正品的概率，剩下的可能性(有一个或更多的次品二极管)一定有概率 $1-p$. 则 C 的平均或期望值是

$$EC=(4+n)p+[(4+n)+5n](1-p). \tag{4}$$

第四步，一共有 n 个二极管，一个二极管为次品的概率是 0.003. 换句话说，一个二极管是正品的概率为 0.997. 假设每个二极管都是相互独立的，于是一个检验组内的 n 个二极管全部是正品的概率为 $p=0.997^n$.

随机变量 C 的期望值是

$$EC=(4+n)0.997^n+[(4+n)+5n](1-0.997^n)$$

$$= (4+n) + 5n(1-0.997^n)$$
$$= 4 + 6n - 5n(0.997)^n,$$

每一个二极管的平均检验费用为

$$A = \frac{4}{n} + 6 - 5(0.997)^n. \tag{5}$$

强大数定律告诉我们如果一直使用每组有 n 个二极管的分组检验的方法，这个公式提供了平均的检验费用. 这时我们需要作为 n 的函数来极小化 A. 我们把推导的细节留给读者(习题 1)当 $n=17$ 时 A 取最小值 $A=1.48$(分/二极管).

第五步给出结论. 对于检验次品二极管的质量控制步骤可以使用分组检验的方法做得非常经济. 逐个检验的花费是 5 分/个. 次品的二极管出现得很少，每一千的中只有三个. 使用每一组 17 个二极管串联起来分组化验，在不影响质量的前提下可以将检验的费用降低到三分之一(1.5 分/二极管).

在这一类问题中灵敏性的分析是关键. 质量控制步骤的实行将依赖于若干模

253

型范围之外的因素. 也许由于我们操作的特殊性对于 10 个或 20 个一批的二极管或者 n 是 4 或 5 的倍数时检验起来更容易. 好在对于我们的问题来说，在 $n=10$ 和 $n=35$ 之间时检验的平均花费 A 没有明显的变化. 分析的细节我们仍然留给读者完成. 在操作过程中的次品率 $q=0.003$ 同样也是必须考虑的. 例如，这个数值可能会随着工厂内的环境条件而发生变化. 将我们上面的模型推广，我们有

$$A = \frac{4}{n} + 6 - 5(1-q)^n. \tag{6}$$

在 $n=17$ 时我们有

$$S(A,q) = \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}q} \cdot \frac{q}{A} = 0.16,$$

于是，q 的微小的改变很可能不会导致检验费用大的变化.

更一般的稳健性分析要考虑独立性的假设. 我们这里必需要假设在操作过程中接连出现次品的次数之间是无关的. 事实上，有可能由于生产环境中的一些异常的原因，如工作台的颤动或电压变化的冲击，使得次品的二极管趋向于出现在一些批次中. 这时，独立随机变量模型的数学分析就不能完全处理这个问题. 在下一章介绍的随机过程的模型可以描述某些具有依赖性的问题，然而还有一些其他的有依赖性的问题就不容易给出解析的表达式了. 有关稳健性的问题是当前概率论研究中一个非常活跃和吸引人的分支. 实际上，模拟的结果倾向于表明基于独立随机变量的期望值模型是相当稳健的. 更重要的是，通过经验人们发现，在许多情形下，这样的模型为现实的生活提供了有用的和精确的近似.

7.2 连续概率模型简介

这一节，我们研究基于取值连续的随机变量的概率模型. 这些模型在表示随机的时间方面特别方便. 所需要的数学理论除了使用积分来代替求和之外完全类

似于离散的情况.

例 7.3　“Ⅰ型计数器”可以用来测量可裂变物质的样品放射性的衰变. 衰变是以未知的速率随机发生的，计数器的目的就是测量衰变率. 每一次放射性衰变就要把计数器锁住 3×10^{-9} 秒，在这段时间内所发生的任何衰变都不会被计数. 如何调整计数器接收的数据以考虑丢失的信息？ 254

我们将使用五步法. 图 7-3 综述了第一步的结果. 步骤二是选择建模的方法. 我们将使用连续的概率模型.

变量：

λ＝衰变率(每秒)

T_n＝第 n 次观测到衰变的时间

假设：

放射性的衰变以速率 λ 随机发生.

对于任何 n，$T_{n+1}-T_n\geqslant 3\times10^{-9}$.

目标： 根据有限的观测值 T_1，…，T_n 求出 λ.

图 7-3　关于放射性衰变问题第一步的结果

255

假设 X 是在实数轴上取值的随机变量. 描述 X 的概率结构的恰当方式是使用函数

$$F(x)=\Pr\{X\leqslant x\},$$

称之为 X 的分布函数. 如果 $F(x)$是可微的，我们称函数

$$f(x)=F'(x)$$

为 X 的密度函数. 对于任何 a 和 b 我们有

$$\Pr\{a<X\leqslant b\}=F(b)-F(a)=\int_a^b f(x)\mathrm{d}x. \tag{7}$$

换句话说，密度曲线下面的面积就给出了概率. X 的平均值或期望值定义为

$$EX=\int_{-\infty}^{\infty} xf(x)\mathrm{d}x, \tag{8}$$

如果把它写成黎曼和就可以看出，它是由离散的情形直接类推过来的.（详情参见习题 13）. 值得指出的是，这些表示法和术语是从物理学的问题也就是质心的问题中来的. 如果一条金属线或硬杆放在 x 轴上，$f(x)$表示在 x 点处的密度(克/厘米)，则 $f(x)$的积分就表示质量，$xf(x)$的积分就表示质心(当我们研究概率问题时，要假设总的质量等于 1).

在应用中随机到达的特殊情形经常出现. 假设一个到达的现象(例如，顾客的到达，电话的呼叫，放射性的衰变)以速率 λ 随机出现，同时令 X 表示两次连续到达现象之间的随机时间. 通常假设 X 有分布函数

$$F(t)=1-e^{-\lambda t}, \tag{9}$$

则 X 的密度函数是

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \tag{10}$$

我们称这个分布为带有速率参数 λ 的指数分布.

指数分布的一个非常重要的性质是“无记忆性”. 对于任何的 $t>0$ 和 $s>0$，我们有

$$\Pr\{X > s+t \mid X > s\} = \frac{\Pr\{X > s+t\}}{\Pr\{X > s\}} = \frac{e^{-\lambda(s+t)}}{e^{-\lambda s}} = e^{-\lambda t} = \Pr\{X > t\}. \tag{11}$$

换句话说，对于下一次到达现象发生这件事情来说，我们已经等待的 s 单位的时间并不影响直到下一次到达现象发生的时间的(条件)分布. 指数分布会“忘记”我们已经等待了多长的时间. 方程(11)中的概率称为条件概率. 按照定义，已知事件 B 发生时事件 A 发生的概率是

$$\Pr\{A \mid B\} = \frac{\Pr\{AB\}}{\Pr\{B\}}. \tag{12}$$

换句话说，$\Pr\{A \mid B\}$是事件 B 发生的所有可能的事件中事件 A 出现的相对可能性.

256

现在我们开始第三步，模型组建. 我们假设放射性衰变以一个未知的速率 λ 随机地发生. 我们将在如下的假设下组建模型，所有相继两次放射性衰变之间的时间是独立的，而且都服从带有速率参数 λ 的指数分布. 令

$$X_n = T_n - T_{n-1}$$

表示相继两次观测到放射性衰变之间的时间. 自然，由于计数器闭锁时间的原因，X_n 与相继两次衰减之间的时间的分布是不同的. 事实上，$X_n \geqslant 3\times10^{-9}$秒以概率 1 发生 1 对于指数分布来说这确实不是真的.

随机时间 X_n 由两部分组成. 首先我们必须等待 $a=3\times10^{-9}$秒，这时计数器被锁住了，同时我们还要多等待 Y_n 秒直到下一次衰变发生. 现在的 Y_n 不只是两次衰减之间的时间，因为它开始于闭锁时间的末尾不是在衰变的时间. 然而，指数分布的无记忆性保证了 Y_n 仍然是带有速率参数 λ 的指数分布.

步骤四是求解模型. 因为 $X_n=a+Y_n$，则 $EX_n=a+EY_n$，其中

$$EY_n = \int_0^\infty t\lambda e^{-\lambda t}\,\mathrm{d}t$$

分部积分求出 $EY_n=1/\lambda$. 于是 $EX_n=a+1/\lambda$. 强大数定律告诉我们

$$\lim_{n\to\infty}\frac{X_1+\cdots+X_n}{n} = a+\frac{1}{\lambda}$$

以概率 1 成立. 换句话说，有$(T_n/n)\to a+1/\lambda$. 当 n 很大时近似地有

$$\frac{T_n}{n} = a+\frac{1}{\lambda}. \tag{13}$$

关于 λ 求解，可得

$$\lambda = \frac{n}{T_n - na}. \tag{14}$$

最后，我们完成步骤五. 我们得到了一个衰变率的公式，它矫正了由于计数器的

闭锁产生的衰变现象的丢失．全部所需要的资料是记录观测衰变的时间和所记录的衰变的次数．在观测间隔内的那些衰变的分布对于确定 λ 是不必要的． 257

灵敏性分析应考虑闭锁的时间 a，它是依经验确定的．确定 a 的精确度将影响到 λ 的精确度．从方程(14)我们算得

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}a}=\lambda^2.$$

则 λ 对 a 的灵敏性是

$$S(\lambda,a)=\lambda^2\left(\frac{a}{\lambda}\right)=\lambda a.$$

这也是在计数器闭锁的时间内衰变次数的期望值．于是我们就可以得到一个对于不太强烈的放射源的 λ 的一个(相对来说)较好的估计值．达到这一点的一个简单的方式就是只取很少一点放射性材料作为样品．另一个潜在误差的来源就是假设

$$\frac{(X_1+\cdots+X_n)}{n}=a+\frac{1}{\lambda}.$$

显然，这个式子不是绝对成立的．虽然当 $n\to\infty$ 时它是收敛的，随机的波动将使得经验性的速率在均值附近变化．这些随机波动的研究是下一节的任务．

最后是关于稳健性的问题．关于衰变过程我们做了一个看来是很特殊的假设．我们假设衰变之间的时间是独立的，同时它服从一个特定的分布(带有速率参数 λ 的指数分布)．称这样的一个到达的过程为*泊松过程*(Poisson process)．泊松过程通常被用于表示随机到达的现象．许多现实世界中的到达过程的间隔时间至少是近似地服从指数分布的事实部分地证明了这种使用法是可以接受的．这个结论可以用收集到的关于到达时间的资料验证．但是这并没有回答我们的问题：*为什么会出现指数分布*．

这里指出一个到达的过程是泊松分布的数学根据．考虑一个大量的到达过程，它们彼此之间是独立的．我们不做关于到达过程的到达时间间隔分布的假设；我们仅仅假设到达的时间间隔是独立且同分布的．这里有一个定理，说的是在相当一般的条件下将所有这些独立的到达过程合并所得到的到达的过程一定是泊松过程．(当合并的过程的个数趋于无穷大时，合并过程趋于泊松过程．)这就是为什么基于指数分布的泊松过程是一个稳健的模型．(参见[Feller，1971]，p. 370) 258

7.3 统计简介

在任何的建模问题中，人们总是希望得到模型性能的定量的度量．对于概率模型来说系统行为的这些参数的得到又增加了复杂性．我们必须要有办法处理表征概率模型特性的系统行为的随机波动．统计学就是关于随机波动度量的研究．适当的使用统计的方法必须是任何概率模型分析的一部分．

例 7.4 (美国)一个地区 911 应急服务中心在过去的一年内平均每月要收到

171 个房屋火灾的电话．基于这个资料房屋的火灾率被估计为每月 171 次．下一个月收到的火灾报警电话只有 153 个．这表明房屋的火灾率实际上减少了，或者它只是一个随机波动？

我们将使用五步法．图 7-4 综述了第一步的结果．我们假设报警电话有指数的间隔时间．步骤二是确定建模的方法，我们将把它处理为统计推断问题．

变量：

λ＝报告的房屋火灾率（每月）

X_n＝第 $n-1$ 次和第 n 次火灾之间的时间（月）

假设：

房屋火灾以速率 λ 随机发生，即，X_1，X_2，…是独立的且每个 X_n 有速率参数为 λ 的指数分布．

目的：

给定 $\lambda=171$，确定每月收到 153 次这样少的电话报警的概率有多大．

图 7-4　关于房屋火灾问题第一步的结果

假设 X，X_1，X_2，X_3，…是独立的随机变量，全部有相同的分布．对于 X 是离散的情况，它的平均或期望值是

259

$$EX=\sum x_k \Pr\{X=x_k\},$$

如果 X 是连续的，带有密度 $f(x)$，则

$$EX=\int xf(x)\mathrm{d}x.$$

另一个称之为*方差*的分布的参数可以度量 X 偏离其平均数 EX 的范围．一般，定义为

$$VX=E(X-EX)^2. \tag{15}$$

如果 X 是离散的，我们有

$$VX=\sum(x_k-EX)^2\Pr\{X=x_k\}. \tag{16}$$

如果 X 是连续的，带有密度 $f(x)$，则

$$VX=\int(x-EX)^2 f(x)\mathrm{d}x \tag{17}$$

有一个称之为*中心极限定理*的结果，说的是当 $n\to\infty$ 时，和式 $X_1+\cdots+X_n$ 的分布越来越接近于一个确定类型的分布，称之为*正态分布*．特别是，如果 $\mu=EX$，$\sigma^2=VX$，则对于所有的实数 t，我们有

$$\lim_{n\to\infty}\Pr\left\{\frac{X_1+\cdots+X_n-n\mu}{\sigma\sqrt{n}}\leqslant t\right\}\to\Phi(t) \tag{18}$$

其中 $\Phi(t)$ 是一个特殊的分布函数，称之为*标准正态分布*．标准正态分布的密度函数定义为

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \tag{19}$$

于是对所有的 t，我们有

$$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \mathrm{d}x. \tag{20}$$

260

图 7-5 给出了标准正态分布的图像. 数值积分表明当 $-1 \leqslant x \leqslant 1$ 时的面积近似于 0.68，$-2 \leqslant x \leqslant 2$ 时的面积近似于 0.95. 于是对于足够大的 n，我们有

$$-1 \leqslant \frac{X_1 + \cdots + X_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \leqslant 1$$

有 68%的次数成立，同时

$$-2 \leqslant \frac{X_1 + \cdots + X_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \leqslant 2 \tag{21}$$

有 95%的次数成立. 换句话说，我们有 68%的把握断言

$$n\mu - \sigma\sqrt{n} \leqslant X_1 + \cdots + X_n \leqslant n\mu + \sigma\sqrt{n},$$

同时有 95%的把握断言

$$n\mu - 2\sigma\sqrt{n} \leqslant X_1 + \cdots + X_n \leqslant n\mu + 2\sigma\sqrt{n}. \tag{22}$$

通常，在实践上我们接受这个 95%的区间(22)作为在随机样本中正常的变化范围. 以防 $X_1 + \cdots + X_n$ 没有落入区间(22)的万一，我们说，这个变化范围在 95%的水平上是统计显著的.

261

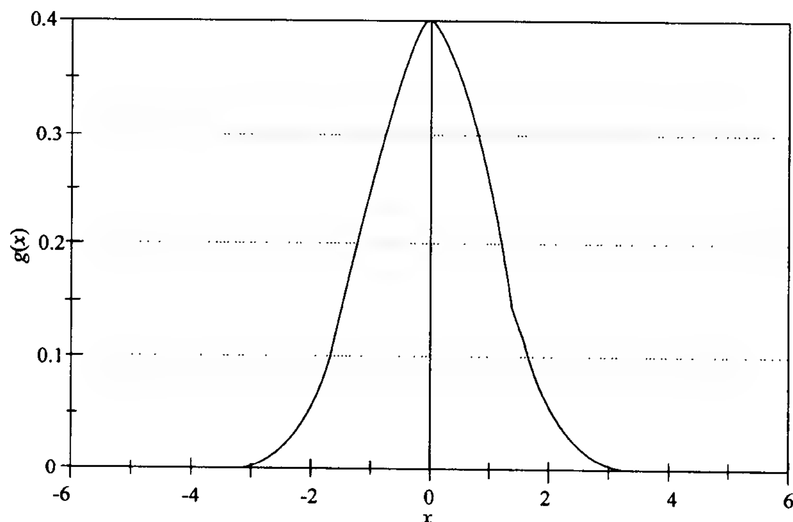


图 7-5　标准正态密度函数 $g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$ 的图像

现在我们开始步骤三，组建模型. 我们假设报警电话之间的时间 X_n 是密度函数为

$$f(x) = \lambda e^{\ \lambda x}$$

的指数分布. 我们有

$$\mu = EX_n = \frac{1}{\lambda}.$$

方差

$$\sigma^2 = VX_n$$

由下式给出

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} \left(x - \frac{1}{\lambda}\right)^2 \lambda e^{\ \lambda x} \mathrm{d}x.$$

中心极限定理给出了$(X_1 + \cdots + X_n)$在它的平均数 n/λ 附近变化范围的概率估计. 特别，我们知道(22)式是以概率 95%成立.

进行第四步，利用分部积分计算

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2},$$

把 $\mu = 1/\lambda$ 和 $\sigma = 1/\lambda$ 代入(22)式，可得如下关系

$$\frac{n}{\lambda} - \frac{2\sqrt{n}}{\lambda} \leqslant X_1 + \cdots + X_n \leqslant \frac{n}{\lambda} + \frac{2\sqrt{n}}{\lambda} \tag{23}$$

一定以概率 95%成立. 将 $\lambda = 171$ 和 $n = 153$ 代入(23)，我们有 95%的把握确信

[262]

$$\frac{153}{171} - \frac{2\sqrt{153}}{171} \leqslant X_1 + \cdots + X_{153} \leqslant \frac{153}{171} + \frac{2\sqrt{153}}{171},$$

也就是说，

$$0.75 \leqslant X_1 + \cdots + X_{153} \leqslant 1.04.$$

因此，我们的观察值

$$X_1 + \cdots + X_{153} \approx 1$$

是在正常的变化范围之内.

最后，我们完成步骤五. 断言火灾报警率降低的证据是不充分的. 所观测到的报警电话的数量也许是正态随机变量的正常的结果. 自然，每月报警电话的数量连续地这样低，则我们就需要重新评估这一情况.

只有很少的问题应该包括在我们的灵敏性分析中. 首先，我们已经断言了：每月 153 个报警电话的总数是在正常的变化范围之内. 更一般地，在一个月内收到了 n 个报警电话. 将 $\lambda = 171$ 代入(23)，我们得到

$$\frac{n}{171} - \frac{2\sqrt{n}}{171} \leqslant X_1 + \cdots + X_n \leqslant \frac{n}{171} + \frac{2\sqrt{n}}{171} \tag{24}$$

以概率 95%成立. 因为对于任何的 $n \in [147, 199]$，区间

$$\frac{n}{171} \pm \frac{2\sqrt{n}}{171}$$

总会包含 1，我们有更一般的结论，有 95%的时间这个社区每月报警电话的次数在 147 到 199 之间.

现在考虑我们的结论对于“报警电话实际的期望值是每月 171 次”的假设的灵敏性. 去掉特殊性，假设每月报警电话的平均值是 λ. 我们有一个月报警电话次数的观测值 $n=153$. 将它代入(23)，我们得到

$$\frac{153}{\lambda}-\frac{2\sqrt{153}}{\lambda}\leqslant X_1+\cdots+X_{153}\leqslant\frac{153}{\lambda}+\frac{2\sqrt{153}}{\lambda} \tag{25}$$

以概率 95%成立. 因为对于任何的 $\lambda\in[128, 178]$区间

$$\frac{153}{\lambda}\pm\frac{2\sqrt{153}}{\lambda}$$

263

总会包含 1，我们断言，对于任何的社区，只要它的平均每月报警电话数在 128 到 178 次之间，一个月有 153 次报警就属于正常的变化范围.

最后要讨论关于稳健性的问题. 我们假设了报警电话之间的时间 X_n 是指数分布. 然而，中心极限定理只要当 μ 和 σ 有限时对于任何的分布都是正确的. 因此，我们的结论事实上对于指数分布的假设是不灵敏的. 这里仅仅要求 σ 与 μ 相比较不是特别的小(对于指数分布有，$\mu=\sigma$). 正如我们在 7.2 节最后所指出的那样，有很好的理由认为就是这样的情况. 自然，我们总能够使用由数据估计出来的 μ 与 σ 进行检验.

7.4 习题

1. 考虑例题 7.1 的二极管问题. 令

$$A(x)=\frac{4}{x}+6-5(0.997)^x$$

表示平均费用函数.

(a)证明在区间 $x>0$ 内 $A(x)$在满足 $A'(x)=0$ 的点上有惟一的最小值.

(b)使用数值方法估计这个最小值(误差在 0.1 内).

(c)在集合 $x=1, 2, 3, \cdots$内求 $A(x)$的最小值.

(d)在集合 $10\leqslant x\leqslant 35$ 上求 $A(x)$的最大值.

2. 再考虑例题 7.1 的二极管问题. 在这个习题中我们将研究次品率 q 的估计的问题. 在例题 7.1 中我们假设 $q=0.003$，换句话说，就是每 1 000 个二极管中有 3 个次品.

(a)假设我们检验 1 000 个二极管并且发现有 3 个是次品. 在这个基础上，我们估计 $q=3/1\,000$. 使用五步方法和作为一个统计推断问题的模型，分析这个估计的精度是多大? [提示：定义一个随机变量 X_n 表示第 n 个二极管的状态. $X_n=0$ 表示第 n 个二极管是好的，如果第 n 个二极管是次品，则 $X_n=1$. 于是和式

264

$$\frac{X_1+\cdots+X_n}{n}$$

表示次品二极管所占的比例，同时中心极限定理就可以用来估计这个和式与真实的均值 q 之差的可能的变化.]

(b)假设 10 000 个二极管中发现 30 个是坏的. 重复(a)的分析.

(c)检验多少二极管就可以以 95%的可信度确信所确定的次品率在真值的 10%的误差范围内？假定真值接近于我们原来的估计 $q=0.003$.

(d)检验多少二极管就可以以 95%的可信度确信所确定的次品率在真值的 1%的误差范围内？假定真值接近于我们原来的估计 $q=0.003$.

3. 考虑例 7.3 的放射性衰变的问题，同时假设我们的计数器记录了 30 秒的周期内 10^7 次/秒的平均衰变率.

(a)使用式(14)去估计实际的衰变率 λ.

(b)用中心极限定理推广(13)式. 对于任意的真实的衰变率 λ 的数值计算所观测的衰变率 T_n/n 在 95%水平下的正常变化的范围.

(c)如果观测的衰变率 $T_n/n=10^7$ 是在 95%的水平下在正常的变化范围内，确定 λ 的范围. 我们在(a)中给出的估计值的精确度有多大？

(d)要对放射性材料检验多长时间才能使我们在 95%的可信度下断定真实的衰变率有六位有效数字(也就是误差在 $0.5\times10^{-6}\lambda$ 范围内)？

4. 可以证明，在区间 $-3\leqslant x\leqslant 3$ 标准正态密度函数(19)图像下的面积近似于 0.997. 也就是说，对于充分大的 n，我们有大约 99.7%的把握断言

$$n\mu-3\sigma\sqrt{n}\leqslant X_1+\cdots+X_n\leqslant n\mu+3\sigma\sqrt{n}.$$

利用这个事实，在 99.7%的可信度水平下重复习题 3 的计算. 在这个可信度水平下对(d)中你的答案的灵敏性给出评论.

5. 考虑例 7.4 的房屋火灾问题. 在这个习题中我们将研究火灾电话报警率 λ 的估计的问题.

(a)假设在一年的周期中收到了 2 050 个报警电话. 估计每月的火灾发生率 λ.

(b)假设 λ 的真实数值是每月 171 个电话，计算一年中收到报警电话个数的正常变化的范围.

(c)如果一年 2 050 个电话处于正常变化范围之内，计算 λ 的范围. 我们关于真实的火灾发生率 λ 的估计的精确度有多大？

265

(d)为了得到 λ 精确到最接近的整数(误差为 ±0.5)的估计，需要多少年的资料？

6. 再次考虑例 7.4 中的房屋火灾的问题. 下面的随机过程被称为泊松过程，因为在长度为 t 的时间区间内(电话)到达的数目 N_t 有泊松分布. 特别地，对于所有的 $n=1，2，\cdots$

$$\Pr\{N_t=n\}=\frac{e^{-\lambda t}(\lambda t)^n}{n!}.$$

(a)证明

$$EN_t = \lambda t$$

同时

$$VN_t = \lambda t.$$

(b)使用泊松分布计算在一个给定的月份收到的电话的次数偏离平均数 171 次的 18 次的概率.

(c)将(b)中的计算推广为一个月的电话数目在 95%的水平下准确的正常变化范围.

(d)将(c)中使用的方法与例 7.4 关于灵敏性分析的讨论中正常变化范围的近似计算进行比较. 对于确定一天内电话数目的正常变化范围哪一个方法更精确. 对于一年又如何?

7. 密歇根州的彩票有一种博彩，方法是你用一元钱买一张彩票，其中有一个你所挑选的三位数码. 如果你的数码在当天被抽中，你就赢得 500 美元.

(a)假如你每周买一张彩票买了一年. 你在这一年内成为赢家的机会有多大? [提示：容易计算成为输家的概率!]

(b)如果每周购买多于一张彩票，这一年能否改善你成为赢家的机会? 如果每周你买 $n(n=1, 2, 3, \cdots, 9)$张彩票，计算你成为赢家的概率.

(c)如果这种博彩每周卖出 1 000 000 张彩票. 这个州在一周内所赚的钱数可能的变化范围是什么? 这个州有多大可能性输钱? 使用中心极限定理.

(d)使用中心极限定理解答(a)和(b)的错误是什么?

266

8. (Murphy 法则—部分 1)你住在一个市区的旅馆. 旅馆的前面有一个出租汽车站. 出租车的到达是随机的，大约每五分钟一辆.

(a)假设你走出来时，旅馆前没有汽车. 你期待等到一辆出租汽车要多长时间?

(b)下一辆车到达的时间称为*向前递推时间*. 从最近一次到达到现在的时间称为*向后递推时间*. 对于泊松过程，可以证明向前和向后递推的时间有相同的分布. (如果使时间逆向前进过程的概率行为是相同的.)使用这个事实计算，平均来说前面一辆出租车到达后多长时间你就从旅馆出来了?

(c)如果出租汽车到达之间的平均时间长度是五分钟. 你刚错过的那辆车与你必须等待的下辆车到达时间之间的平均间隔是多少?

9. (Murphy 法则—部分 2)你站在超市收款台前等待收款. 在你等待了超乎寻常的长时间交款之后，你决定进行一项试验. 一个接一个人地观测每一个顾客等待时间的长度. 这个观测一直进行下去，直到你发现一个人，他等待的时间比你还长.

(a)令 X 表示你必须等待的时间，X_n 表示第 n 个顾客等待的时间. 令 N 表示 $X_n \geqslant X$ 中第一个顾客 n 的编号. 为公平起见，假设 X，X_1，X_2，…是同

分布的．解释为什么 $N \geqslant n$（即在由你和前面的 $n-1$ 个顾客组成的群体之中，你等待的时间最长）的概率一定等于 $1/n$.

(b)计算随机变量 N 的概率分布.

(c)计算期望值 EN，它表示直到你发现比你等待的时间更长者为止你所观测的平均顾客的人数.

10. (Murphy 法则—部分 3)一个忙于实习的内科医生大约平均每两周一次被召唤到医院处理严重的心脏病人．假设这位医生的病人群体中心脏病以这样的比率随机出现．一次这样的紧急召唤就是一个挑战，每天两次这样的召唤就是灾难.

267

(a)这位医生每一年平均处理多少心脏病人?

(b)解释为什么 n 个心脏病人在一年内全部在不同天发病的概率是

$$\frac{365}{365}\cdot\frac{364}{365}\cdot\frac{363}{365}\cdots\frac{365-n+1}{365}.$$

(c)这位医生在这一年同一天会诊两个或多个心脏病人的概率是多大?

11. 16 架轰炸机组成的中队需要穿过空中防线到达它的目标．它们要么低空飞行将它们自己暴露于空防火炮之下，要么高空飞行将它们自己暴露于地空导弹的射程之内．在这两种情形下空中防御的射击按照三个阶段顺序进行．首先必须侦察目标，然后发现目标(锁定目标)，最后必须攻击目标．这三个阶段的每一个也许成功，也许不成功．它们的概率如下：

类型	P(侦察)	P(发现)	P(攻击)
低空	0.90	0.80	0.05
高空	0.75	0.95	0.70

火炮每分钟射击 20 发，导弹每分钟发射 3 发．所计划的飞行路线如果是低空飞行一分钟将暴露飞机，如果高空飞行则要五分钟.

(a)确定最优的飞行路线：低空或高空．目标是最大化安全到达攻击目标的轰炸机的数量.

(b)每一架轰炸机有 70% 的机会摧毁目标．利用(a)的结果确定完成任务(目标被摧毁)的机会有多大.

(c)为保证有 95% 的可能完成任务最少需要多少架轰炸机.

(d)关于一架轰炸机能够摧毁目标的概率 $p=0.7$ 作灵敏性分析．考虑必须派出的轰炸机的架数以保证有 95% 的可能完成任务.

(e)恶劣的天气将会降低发现目标的概率 P(侦察)和轰炸机摧毁目标的概率 p．如果所有这些概率均以相同的比率降低，哪一方将在恶劣的天气下占到优势?

12. 扫描无线电通讯传感器企图查明无线电发射器并确定它们的位置．传感器扫

描 4 096 个频带. 传感器要用 0.1 秒去发现信号. 如果没有发现信号，它就移动到下一个频率. 如果一个信号被检测到了，就需要再加 5 秒的时间用以确定它的位置. 除掉大约 100 个频带之外没有其他的信号，但是传感器不知道哪一个频道被使用了，因此全部都需要扫描. 在繁忙的频率上，百分占用率(即信号所占用的时间的比例)在 30%到 70%之间变化. 一个额外的困难是在同一个频率上的反射信号可能有几个不同的发射源，因此，传感器必须连续扫描所有的频率直到一个发射源被定位. 268

(a)确定这个系统近似的检测速率. 假设所有的频带被逐个扫描.

(b)假设传感器能够记忆 25 个重点的频带，这些频带和其他频带一样被扫描十次之多. 假设传感器最终能够识别 25 个繁忙的频率同时把它们作为重点. 检测率如何变化?

(c)假设为了得到有用的信息我们必须能够以每三分钟一次的最小的速率检测在特定频率上的发射源. 确定最优的高度优先的通道的数目.

(d)对(c)的结果关于繁忙频率的平均占用率作灵敏性分析.

13. 在这个问题中我们研究离散和连续随机变量之间的相似性. 假设 X 是连续的随机变量，具有分布函数 $F(x)$和密度函数 $f(x)=F'(x)$. 对于每个 n 我们定义离散的随机变量 X_n 有近似于 X 的分布. 把实轴划分为长度为 $\Delta x=n^{-1}$ 的区间，同时令 I_i 表示分划中的第 i 个区间. 对于每个 I，在第 i 个区间内选择点 x_i，同时定义

$$p_i = \Pr\{X_n = x_i\} = f(x_i)\Delta x.$$

(a)解释为什么我们总能选择点 x_i，使得对于所有的 i 有

$$p_i = \Pr\{X \in I_i\}$$

它保证了 $\Sigma p_i=1$.

(b)对于任意两个实数 a 和 b，以密度函数 f 的形式给出表示 $a<X_n\leqslant b$ 的概率的公式.

(c)以密度函数 f 的形式给出表示均值 EX_n 的公式.

(d)使用(b)的结论证明当 $n\to\infty$时(或 $\Delta x\to 0$ 时)，对任意的两个实数 a 和 b 我们有

$$\Pr\{a < X_n \leqslant b\} \to \Pr\{a < X \leqslant b\}$$

我们说 X_n 在分布上收敛于 X.

(e)使用(c)的结论证明当 $n\to\infty$时(或 $\Delta x\to 0$ 时)，我们有

$$EX_n \to EX.$$

269

我们说 X_n 在平均上收敛于 X.

14. (几何分布)在这个问题中我们研究指数分布的离散形式. 假设一个到达的事件在时间点 $i=1, 2, 3, \cdots$随机发生. 则两次相连接的到达之间的时间有几何分布

$$\Pr\{X = i\} = p\{1 - p\}^{i-1}$$

其中 p 是一个到达事件在时间 i 发生的概率.

(a)证明 $\Pr\{X>i\}=(1-p)^i$. (提示：使用几何级数 $1+x+x^2+x^3+\cdots=(1-x)^{-1}$).

(b)使用(a)的结论证明 X 有无记忆性 $\Pr\{X>i+j \mid X>j\}=\Pr\{X>i\}$.

(c)计算 $EX=1/p$. (提示：微分几何级数，得到 $1+2x+3x^2+\cdots=(1-x)^{-2}$)解释为什么 p 是离散过程的到达率.

(d)顾客以每 10 分钟一人的速率随机地到达一个公用电话亭. 如果 Y 是第一个下午到达的时间，使用指数模型计算 $\Pr\{Y>5\}$. 如果 X 是直到下一次到达的分钟数(使用钟表时间 Y 同时只记录分钟的 X)，使用几何模型计算 $\Pr\{X>5\}$并进行比较.

7.5 进一步的阅读文献

Barnier, W. *Expected Loss in Keno*, UMAP module 574.

Berresford, G. *Random Walks and Fluctuations*, UMAP module 538.

Billingsley, P. (1979). *Probability and Measure*, Wiley, New York.

Carlson, R. *Conditional Probability and Ambiguous Information*, UMAP module 391.

Feller, W. (1971). *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol. 2, 2nd ed., Wiley, New York.

Moore, P. and McCabe, G. (1989). *Introduction to the Practice of Statistics* W.H. Freeman, New York.

Ross, S. (1985). *Introduction to Probability Models*, 3rd ed., Academic Press, New York.

270 ~ 271

Watkins, S. *Expected Value at Jai Alai and Pari-Mutuel Gambling*, UMAP module 631.

Wilde, C. *The Poisson Random Process*, UMAP module 340.

第8章 随机模型

这本书第二部分的确定型动态模型无法对不确定性给出显式的表达式．当我们考虑随机效应时，所得到的模型称为随机模型．当今有几类一般的随机模型被广泛地使用着．在这一章我们将介绍几个最重要且经常使用的随机模型．

8.1 马尔可夫链

马尔可夫链是一个离散时间的随机模型．它是在第 4.3 节介绍的离散时间动态系统模型的推广．虽然这个模型是简单的，但它的应用的数量之大、花样之多是令人惊讶的．这一节我们将介绍一般的马尔可夫链模型．我们也将同样介绍适用于随机模型的稳定状态的概念．

例 8.1 一个宠物商店出售 20 加仑[⊖]的水族箱．每个周末商店的老板要盘点存货，开出定单．商店的策略是，如果当前所有的存货都被售出了就在这个周末进三个新的 20 加仑的水族箱．如果只要在店内还保存有一个存货，就不再进新的水族箱．这个策略是基于商店平均每周仅出售一个水族箱的事实提出的．这个策略是不是能够保证防止当商店缺货时顾客需要水族箱而无货销售的损失？

我们将使用五步方法．步骤一是提出一个问题．这个商店在每个销售周的开始的存货在一个到三个水族箱之间．在一周内销售的个数依赖于供给和需求这两方面．需求是每周平均一个，但是是随机波动的．完全可能在某些周需求将超过供给，即使一周的开始就有三个水族箱的最大的库存．我们希望计算需求超过供给的概率．为了得到明确的答案，我们需要给出关于需求的概率特征的假设．似乎有理由假设潜在的购买者在每一周以一定的概率随机到达．因此，在一周内潜在的购买者的数目服从均值为 1 的泊松分布．（泊松分布在第 7 章的习题 6 中做了介绍.）图 8-1 综合了步骤一的结果．

272

步骤二是选择建模的方法．我们将使用马尔可夫链模型．

马尔可夫链能够描述为一个随机跳跃的序列．对于这本书来说我们将假设这个跳跃序列将仅包含有限个离散的位置或状态的集合．假设随机变量 X_n 在有限的离散集合中取值．不妨假设

$$X_n \in \{1,2,3,\cdots,m\}.$$

我们说序列 $\{X_n\}$ 是马尔可夫链，如果 $X_{n+1}=j$ 的概率仅仅依赖于 X_n．如果我们定义

$$p_{ij} = \Pr\{X_{n+1} = j \mid X_n = i\}, \tag{1}$$

⊖ 1 加仑 $=3.785\ \mathrm{dm}^3$（美加仑）
$=4.546\ \mathrm{dm}^3$（英加仑）

则过程$\{X_n\}$将来的全部性质就被 p_{ij} 和 X_0 的初始概率分布确定了．当然，我们这里说"被确定了"是指概率 $\Pr\{X_n=i\}$ 被确定了．X_n 的实际数值将依赖于随机因素．

变量：

S_n＝第 n 周之初水族箱的供应

D_n＝第 n 周内水族箱的需求

假设：

如果 $D_{n-1}<S_{n-1}$，则 $S_n=S_{n-1}-D_{n-1}$

如果 $D_{n-1}\geq S_{n-1}$，则 $S_n=3$

$\Pr\{D_n=k\}=e^{-1}/k!\ \ k=0,1,2,3,\cdots$

目标： 计算 $\Pr\{D_n>S_n\}$

273

图 8-1　存货问题步骤一的结果

例 8.2　描述如下的马尔可夫链的特性．状态变量

$$X_n\in\{1,2,3\}.$$

如果 $X_n=1$ 则 $X_{n+1}=1$，2 或 3 以相等的概率出现．如果如果 $X_n=2$，则 $X_{n+1}=1$，以概率 0.7 出现，$X_{n+1}=2$，以概率 0.3 出现．如果 $X_n=3$，则 $X_{n+1}=1$ 以概率 1 出现．

状态转移概率 p_{ij} 由下式给出

$$\begin{aligned}p_{11}&=\frac{1}{3}\\p_{12}&=\frac{1}{3}\\p_{13}&=\frac{1}{3}\\p_{21}&=0.7\\p_{22}&=0.3\\p_{31}&=1,\end{aligned}$$

其他的为零．习惯上将 p_{ij} 写成矩阵的形式：

$$P=(p_{ij})=\begin{pmatrix}p_{11}&\cdots&p_{1m}\\\vdots&\ddots&\vdots\\p_{m1}&\cdots&p_{mm}\end{pmatrix}\tag{2}$$

这里

$$P=\begin{pmatrix}1/3&1/3&1/3\\0.7&0.3&0\\1&0&0\end{pmatrix}.$$

274

另一个更方便的方法被称为状态转移图．(参见图 8-2)很容易看出马尔可夫链是

一个随机跳跃的序列.

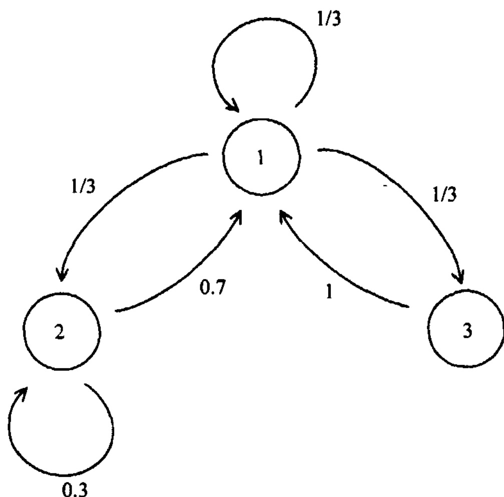


图 8-2 例 8.2 的状态转移图

假设 $X_0=1$. 则 $X_1=1$，2 或 3 各以概率 1/3 出现. $X_2=1$ 的概率可以通过计算与从状态 1 在两步内转移到状态 1 的每一条序列有关的概率得到. 于是

$$\Pr\{X_2=1\}=\left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{3}\right)(0.7)+\left(\frac{1}{3}\right)(1)=0.67\bar{7}.$$

类似地

$$\Pr\{X_2=2\}=\left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{3}\right)(0.3)=0.21\bar{1},$$

和

$$\Pr\{X_2=3\}=\left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{3}\right)=\frac{1}{9}.$$

为了对于较大的 n 计算 $\Pr\{X_n=j\}$，注意到下面的式子是有益的

$$\Pr\{X_{n+1}=j\}=\sum_i p_{ij}\Pr\{X_n=i\}.$$

在时间 $n+1$ 达到状态 j 的途径只能是在时间 n 在状态 i，然后从 i 跳到 j. 因此我们能够算出

275

$$\Pr\{X_2=1\}=p_{11}\Pr\{X_1=1\}+p_{21}\Pr\{X_1=2\}+p_{31}\Pr\{X_1=3\},$$

等等. 这里正是矩阵表示法表现出其优越性之处. 如果我们令

$$\pi_n(i)=\Pr\{X_n=i\}, \tag{3}$$

则式(3)可以写成如下形式

$$\pi_{n+1}(j)=\sum_i p_{ij}\pi_n(i). \tag{4}$$

如果我们令 π_n 表示元素为 $\pi_n(1)$，$\pi_n(2)$，…的向量，同时令 P 表示式(2)中的矩阵，则 π_{n+1} 与 π_n 关系的方程组能够写成更紧凑的形式

$$\pi_{n+1} = \pi_n P. \tag{5}$$

例如，我们有 $\pi_2 = \pi_1 P$，或者

$$\left(0.67\overline{7}, 0.21\overline{1}, \frac{1}{9}\right) = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)\begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

现在我们能够计算 $\pi_3 = \pi_2 P$ 得到

$$\pi_3 = (0.485, 0.289, 0.226)$$

[276] 精确到第3位小数继续下去，我们得到

$$\pi_4 = (0.590, 0.248, 0.162)$$
$$\pi_5 = (0.532, 0.271, 0.197)$$
$$\pi_6 = (0.564, 0.259, 0.177)$$
$$\pi_7 = (0.546, 0.266, 0.188)$$
$$\pi_8 = (0.556, 0.262, 0.182)$$
$$\pi_9 = (0.551, 0.264, 0.185)$$
$$\pi_{10} = (0.553, 0.263, 0.184)$$
$$\pi_{11} = (0.553, 0.263, 0.184)$$
$$\pi_{12} = (0.553, 0.263, 0.184).$$

注意到概率 $\pi_n(i) = \Pr\{X_n = i\}$ 随着 n 的增加趋向于确定的极限值．我们说随机过程趋近于稳定的状态．这个稳定状态或者平衡状态的概念是与确定性动态模型相应的概念是不同的．由于随机波动，我们不能期望当系统稳定时状态变量将停留在一个数值上．我们能达到的最好的希望是状态变量的概率分布将趋于一个极限分布．我们称它为稳定状态分布．在例8.2中我们有

$$\pi_n \to \pi,$$

这里稳定状态概率向量为

$$\pi = (0.553, 0.263, 0.184) \tag{6}$$

达到了3位小数一个较快的计算稳定状态向量的方式如下：假设

$$\pi_n \to \pi.$$

自然有

$$\pi_{n+1} \to \pi$$

如果我们令式(5)两边取 $n \to \infty$，可以得到

$$\pi = \pi P. \tag{7}$$

我们能够通过求解线性方程组来计算 π．对于例8.2我们有

$$(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)\begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

不难算出(6)式当

$$\sum \pi_i = 1.$$

时是这个方程组的惟一的解. 并不是每一个马尔可夫链都将趋于稳定的状态. 例如，考虑两状态的马尔可夫链，其中

$$\Pr\{X_{n+1} = 2 \mid X_n = 1\} = 1$$

和

277

$$\Pr\{X_{n+1} = 1 \mid X_n = 2\} = 1.$$

状态变量在状态 1 和 2 之间选择. 确实 π_n 不趋近于一个单个的极限向量. 我们说这个马尔可夫链是二周期的. 一般地，我们说 X_n 是 δ 周期的，如果在 $X_n=i$ 开始，这个链仅仅在时间 $n+k\delta$ 又回到状态 i. 如果 $\{X_n\}$ 是非周期的($\delta=1$)，同时如果对于每个 i 和 j 从 i 跳转 j 在有限数的步长内是可能实现的，我们称 X_n 是**遍历的**. 这里有定理保证一个遍历的马尔可夫链一定趋近于稳定的状态. 进而，X_n 的分布趋近于同一个稳定状态的分布，且与系统的初始状态无关. (参见[Cinlar，1975]，p. 152)于是，在例 8.2 中如果我们从 $X_0=2$ 或 $X_0=3$ 开始，我们仍然可以看到 π_n 收敛于由(4)式给出的同一个稳定状态的分布 π. 计算稳定状态概率向量 π 的问题数学上相当于在状态空间 $\pi\in\mathbb{R}^m$ 寻求离散时间动态系统的平衡态的问题，其中 $0\leqslant\pi_j\leqslant1$

$$\sum \pi_j = 1$$

迭代函数是

$$\pi_{n+1} = \pi_n P.$$

前面提到的定理说的是只要 P 表示一个遍历的马尔可夫链，这个系统就有惟一的渐近稳定的平衡态 π.

我们现在回到例 8.1 的存货问题. 我们将使用马尔可夫链来给这个问题建模. 步骤三是组建模型. 我们从研究状态空间开始. 这里状态的概念与确定性的动态系统是一样的. 状态包含有为预报这个过程(概率上)的将来所必须的全部信息. 我们将取 $X_n=S_n$ 作为状态变量，它表明在我们这个销售周一开始库存水族箱的数量. 需求量 D_n 与模型的动态有关，将被用来构成状态转移矩阵 P. 状态空间是

$$X_n \in \{1,2,3\}.$$

278

我们不知道初始状态，但是似乎有理由假设 $X_0=3$. 为了确定 P，我们将从画状态转移图开始. 参见图 8-3. 需求量的分布为

$$\Pr\{D_n = 0\} = 0.368$$
$$\Pr\{D_n = 1\} = 0.368$$
$$\Pr\{D_n = 2\} = 0.184$$
$$\Pr\{D_n = 3\} = 0.061$$

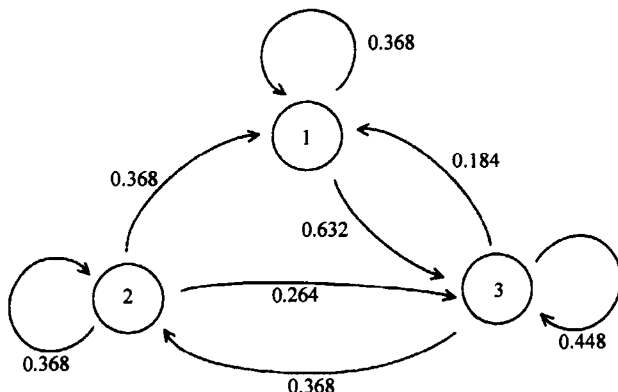
$$\Pr\{D_n > 3\} = 0.019, \tag{8}$$

于是，如果 $X_n=3$，则

$$\Pr\{X_{n+1} = 1\} = \Pr\{D_n = 2\} = 0.184$$
$$\Pr\{X_{n+1} = 2\} = \Pr\{D_n = 1\} = 0.368$$
$$\Pr\{X_{n+1} = 3\} = 1 - (0.184 + 0.368) = 0.448.$$

其余的状态转移概率可类似地计算. 状态转移矩阵是

$$P = \begin{bmatrix} 0.368 & 0 & 0.632 \\ 0.368 & 0.368 & 0.264 \\ 0.184 & 0.368 & 0.448 \end{bmatrix}. \tag{9}$$



279

图 8-3　存货问题的状态转移图

现在我们进行步骤四. 分析的目标是要计算需求超过供给的概率

$$\Pr\{D_n > S_n\}$$

一般来说，这个概率依赖于 n. 更具体地说，它依赖于 X_n，如果 $X_n=3$，则

$$\Pr\{D_n > S_n\} = \Pr\{D_n > 3\} = 0.019,$$

等等. 为了得到关于需求多么经常超过供给的更好的想法，我们需要更多关于 X_n 的信息.

因为$\{X_n\}$是一个遍历的马尔可夫链，我们知道一定存在惟一的渐近稳定的概率向量 π，它可以通过求解稳定状态方程计算出来. 将方程(9)代回(7)式，我们得到

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 0.368\pi_1 + 0.368\pi_2 + 0.184\pi_3 \\ \pi_2 &= 0.368\pi_2 + 0.368\pi_3 \\ \pi_3 &= 0.632\pi_1 + 0.264\pi_2 + 0.448\pi_3, \end{aligned} \tag{10}$$

我们需要在条件

$$\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1,$$

下求解得到 X_n 的稳定状态分布. 因为我们现在有四个方程含三个变量，我们能

够从方程组(10)中消去一个，然后求解，得到

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3) = (0.285, 0.263, 0.452).$$

对于充分大的 n，近似有

$$\Pr\{X_n = 1\} = 0.285$$
$$\Pr\{X_n = 2\} = 0.263$$
$$\Pr\{X_n = 3\} = 0.452.$$

将它与我们关于 D_n 的信息放在一起，我们得到，

280

$$\begin{aligned}\Pr\{D_n > S_n\} &= \sum_{i=1}^{3} \Pr\{D_n > S_n \mid X_n = i\} \Pr\{X_n = i\} \\ &= (0.264)(0.285) + (0.080)(0.263) + (0.019)(0.452) \\ &= 0.105\end{aligned}$$

在长时间的运行中，需求将有 10%的时间超过供给.

容易计算稳定状态的概率分布. 图 8-4 描述了使用计算机代数系统 MAPLE 去求解方程组(10)得到稳定状态概率分布的过程. 计算机代数系统在这样的问题中是相当有用的，特别是在进行灵敏性分析时. 如果你利用计算机代数系统，将有助于计算本章后面的习题. 假如你善于手算求解方程组，你就有能力去验证你的结果.

```
> s:={pi1=.368*pi1+.368*pi2+.184*pi3,
>       pi2=.368*pi2+.368*pi3,
>       pi1+pi2+pi3=1};
        s:= {π1 = .368 π1 + .368 π2 + .184 π3, π2 = .368 π2
                  + .368 π3, π1 + π2 + π3 = 1}
> solve(s,{pi1,pi2,pi3});
              {π3 = .4519843569, π1 = .2848348783,
                     π2 = .2631807648}
```

图 8-4 对于库存问题在一周之初库存水族箱的个数的稳定状态分布的计算. 使用计算机代数系统 MAPLE

最后，我们进行步骤五. 当前的存货策略导致有大约 10%的时间的无货销售的损失，或者说每年至少有 5 次缺货. 这主要是由于当仅有一个水族箱的库存时我们没有更多地进货. 虽然我们每周平均仅仅出售一个，每一周潜在销售的实际个数(需求)从一周到下一周是波动的. 因此当我们开始仅有一个水族箱库存的这一周的销售时，我们冒着很大的(大约是四分之一)由于不充足的库存而失去潜在的销售机会的损失. 如果不存在其他的因素，例如对预定三个或更多的水族箱时打折扣等，似乎有理由尝试新的策略使得不会在开始一周的销售时仅有一个水族箱.

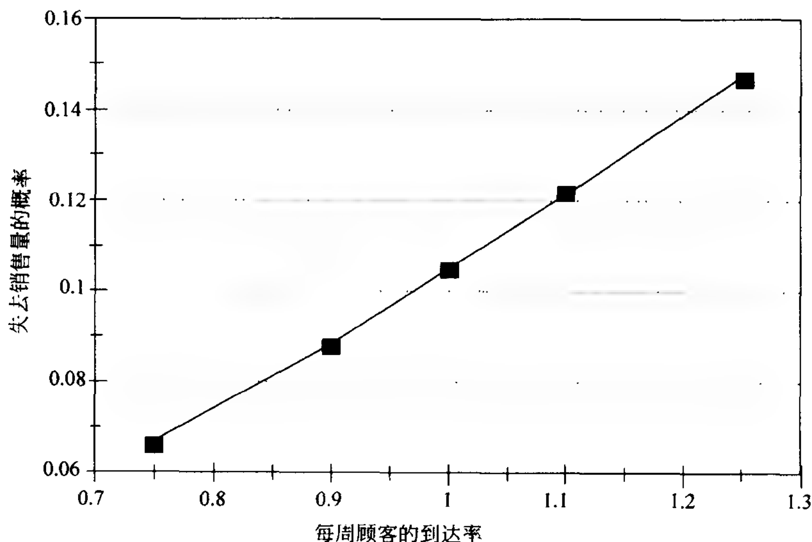
我们现在进行灵敏性和稳健性的分析. 主要的灵敏性来自于潜在的购买者的

到达率 λ 对需求超过供给的概率的影响. 当前是每周到达 $\lambda=1$ 个顾客. 对于任意的 λ，利用 D_n 有泊松分布的事实，X_n 的状态转移矩阵由下式给出

281

$$P=\begin{pmatrix} e^{-\lambda} & 0 & 1-e^{-\lambda} \\ \lambda e^{-\lambda} & e^{-\lambda} & 1-(1+\lambda)e^{-\lambda} \\ \lambda^2 e^{-\lambda}/2 & \lambda e^{-\lambda} & 1-(\lambda+\lambda^2/2)e^{-\lambda} \end{pmatrix}, \tag{11}$$

虽然从这一点有可能实现 $p=\Pr\{D_n>S_n\}$的计算，但相当繁冗. 更有意义的化简是对在 1 附近选择的少数的 λ 值重复步骤四的计算. 这个演算的结果示于图 8-5 中. 可以确信我们的基本结论对精确的 λ 值不是特别敏感的. 灵敏性 $S(p,\lambda)$大约是 1.5. (灵敏性分析的另一个微妙的选择是使用计算机代数系统进行冗长的计算. 参见本章后面的习题 2).



282

图 8-5　库存问题中失去销售量的概率对到达率的灵敏性

最后，我们考虑模型的稳健性. 我们假设马尔可夫链是基于到达过程的泊松过程模型. 泊松过程模型作为一个更一般到达过程的代表的稳健性已经在 7.2 节的最后简单地讨论过了. 有理由认为如果到达过程不是精确的泊松过程我们的结论也不会有明显的变化. 这里的基本假设是到达过程表示大量独立的到达过程的合并. 不同的顾客到达在不同的时间商店去买 20 加仑的水族箱，有理由假设他们彼此间没有协调他们之间的到达时间. 很自然，某些商店的活动(如宣传水族箱的销售价格)将会使得这个假设无效，就导致需要重新检验我们的模型计算的结论. 如果需求有明显的季节变化也是同样的情况.

另一个模型的基本假设是库存水平 S_n 表示了这个系统的状态. 一个更精巧的模型是考虑到商店的经理对长时间销售量波动(如季节性的变化)的反应. 这样

的模型的分析是非常复杂的，但是与我们这里所做的没有本质的区别. 我们只需要将状态空间扩展到包含过去的销售信息，S_n，S_{n-1}，S_{n-2}，S_{n-3}，…. 很自然，现在的转移矩阵 P 将是 81×81 而不是 3×3.

许多不同的库存策略是可取的. 其中的某些放在了本章最后的习题中. 哪些策略是最好的? 研究这个问题的一种方式是构造一个基于我们的马尔可夫链模型的一般化的最优化模型. 库存策略用一个或几个决策变量描述，同时目标是由结果的稳定状态概率确定. 这一类模型的研究被称为马尔可夫决策理论. 详细情况能够在任何的运筹学的入门教材中找到(参见[Hillier 和 Lieberman, 1990]).

8.2 马尔可夫过程

马尔可夫过程是上一节介绍的马尔可夫链模型的连续时间的类推. 它同样能够作为连续时间动态系统模型的随机的类推被考虑.

例 8.3 一个在重型设备修理厂工作的技工负责铲车的维护和修理. 当铲车损坏时它将被送到修理厂，按到达先后顺序进行修理. 工厂内可以存放 27 台铲车，同时过去的一年工厂修理了 54 台铲车. 每一台铲车平均修理大约三天的时间. 在刚刚过去的几个月，这个操作的有效性和效率上出现了一些问题. 两个核心的问题是修理铲车所用的时间和工人从事于这一任务占用的时间比例.

283

我们使用机器维修的数学模型来分析这一状况. 铲车以每月 54/12＝4.5 台的速率到达工厂来修理. 它们每月被修理的铲车的数量最多为 22/3≈7.3 台，这是基于每月平均有 22 个工作日得到的. 令 X_t 表示时间 t 维修车间的铲车的数量. 我们关心的是时间 t 维修车间的铲车的平均台数 EX_t 和技工从事修理铲车的时间所占的比例，$\Pr\{X_t>0\}$. 图 8-6 综合了步骤一的结果. 我们将使用马尔可夫过程来模拟这个修理厂的状况.

变量：

X_t＝在时间 t 月内修理的铲车的数量

假设：

待修理铲车的到达率为每月 4.5 台，每月的最多修理铲车 7.3 台

目标： 计算 EX_t，$\Pr\{X_t>0\}$

图 8-6 铲车问题步骤一的结果

马尔可夫过程是上一节介绍的马尔可夫链的连续时间的对应. 像前面那样我们将假设状态空间是有限的，即我们将假设

$$X_t \in \{1,2,3,\cdots,m\}.$$

随机过程$\{X_t\}$是马尔可夫过程，如果当前的状态 X_t 真实地描绘着系统的状态，也就是说，它完全确定了过程将来的概率. 这个条件可以用式子写成

$$\Pr\{X_{t+s}=j \mid X_u : u \leqslant t\} = \Pr\{X_{t+s}=j \mid X_t\}. \tag{12}$$

马尔可夫性质等式(12)有两个重要的含义．首先，下一次转移的时刻不依赖于当前的状态维持多长时间．换句话说，在特定状态下的时间的分布具有无记忆性．令 T_i 表示状态 i 维持的时间．则，马尔可夫性质是说

284

$$\Pr\{T_i > t+s \mid T_i > s\} = \Pr\{T_i > t\}. \tag{13}$$

在 7.2 节我们展示了指数分布有这个性质，于是 T_i 应该有密度函数

$$F_i(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}. \tag{14}$$

事实上，只有指数分布是具有无记忆性的概率分布．（这是一个实分析中很深刻的定理．参见[Billingsley，1979]，p. 160.）因此，一个马尔可夫过程特定状态维持时间的分布是参数为 λ_i 的指数分布，参数值一般来说依赖于状态 i.

马尔可夫性质的第二个重要含义与状态转移有关．下一个状态的概率分布仅仅依赖于当前的状态．于是，这个过程所经历的状态序列构成一个马尔可夫链．如果我们令 p_{ij} 表示过程从状态 i 跳跃到状态 j 的概率，则所嵌入的马尔可夫链就具有转移矩阵 $P=(p_{ij})$.

例 8.4　考虑一个马尔可夫链，具有状态转移概率矩阵

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1/3 & 2/3 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \\ 3/4 & 1/4 & 0 \end{pmatrix}, \tag{15}$$

假设 $\{X_t\}$ 的跳跃服从这个马尔可夫链，状态 1、2 和 3 持续的平均时间分别为 1、2 和 3，构成这个马尔可夫过程.

稳定状态方程 $\pi=\pi P$ 的解表明跳跃到状态 1、2 和 3 的比率分别为 0.396、0.227 和 0.377．然而，在每一个状态停留的时间的比例同样依赖于在下一个跳跃之前我们在这个状态停留了多长时间．校正这个结果得到相对的比例为 1(0.396)、2(0.227)和 3(0.377)．如果将它规一化(每一项除以它们的总和)，我们得到 0.200，0.229 和 0.571．因此，这个马尔可夫过程大约有 57.1%的时间处于状态 3，其他也类似．我们称之为马尔可夫过程的稳定状态分布．一般来说，如果 $\pi=(\pi_1, \cdots, \pi_m)$ 是嵌入的马尔可夫链的稳定状态分布，同时 $\lambda=(\lambda_1, \cdots, \lambda_m)$ 是速率向量，则停留于各状态的时间的比例由下式给出

285

$$P_i = \frac{\left(\dfrac{\pi_i}{\lambda_i}\right)}{\left(\dfrac{\pi_1}{\lambda_1}\right)+\cdots+\left(\dfrac{\pi_m}{\lambda_m}\right)}. \tag{16}$$

速率 λ_i 的倒数表示处于状态 i 的平均时间．概括来说，马尔可夫过程能够看作一个马尔可夫链，其中两次跳跃之间的时间服从依赖于当前状态的指数分布．一个等价的模型可以按如下构成．给定 $X_t=i$，令 T_{ij} 服从参数为 $a_{ij}=\lambda_i p_{ij}$ 的指数分布．进而，假设 $T_{i1}, \cdots, T_{im}$ 是独立的．则一直到下一次跳跃的时间 T_i 是 $T_{i1}, \cdots, T_{im}$ 中的最小者，同时如果下一个状态是状态 j，则 T_{ij} 是 $T_{i1}, \cdots,$

T_{im}中的最小者．马尔可夫过程模型的这两个式子之间的数学的等价性可由如下事实得到

$$T_i = \min(T_{i1}, \cdots, T_{im})$$

服从参数为

$$\lambda_i = \sum_j a_{ij}$$

的指数分布，同时

$$\Pr\{T_i = T_{ij}\} = p_{ij}.$$

（证明留给读者．参见本章末的习题6.）参数

$$a_{ij} = \lambda_i p_{ij}$$

依赖这个过程从状态 i 趋向状态 j 的速率．习惯上，将速率 a_{ij} 以速率图的方式描绘出来．对于例8.4的速率图由图8-7给出．通常，马尔可夫过程的结构都是由这样的图来描绘． 286

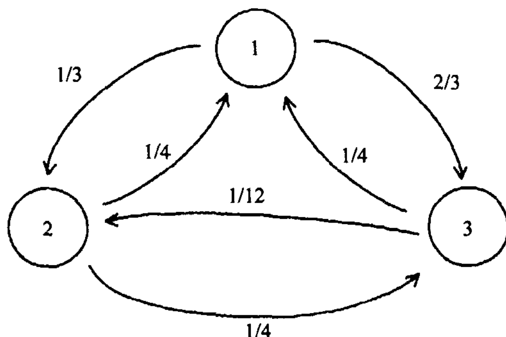


图8-7 例8.4的速率图，图中的速率表明这个过程从一个状态跳跃到另一个状态的趋势

这种马尔可夫过程的表达方式为我们提供了基于速率图来计算稳定状态分布的简便方法．像前面一样，我们定义

$$a_{ij} = \lambda_i p_{ij}$$

为过程从状态 i 跳跃到状态 j 的趋势的速率，同样令

$$a_{ii} = -\lambda_i$$

表示过程趋于离开状态 i 的速率．可以看出概率函数

$$P_i(t) = \Pr\{X_t = i\} \tag{17}$$

一定满足微分方程

$$\begin{aligned} P_1'(t) &= a_{11}P_1(t) + \cdots + a_{m1}P_m(t) \\ &\vdots \\ P_m'(t) &= a_{1m}P_1(t) + \cdots + a_{mm}P_m(t). \end{aligned} \tag{18}$$

（参见[Cinlar，1975]，p. 255.）使用流体流动来类比，这个基本的条件可以更容

易地理解. 直观地说，将概率 $P_i(t)$ 看作在每个状态 i 流体(概率物质)的总量. 速率 a_{ij} 表示流体流动的速率，同时事实

$$P_1(t)+\cdots+P_m(t)=1$$

意味着流体的总量保持等于 1. 在例 8.4 的情形下，我们有

$$\begin{aligned} P_1'(t) &= -P_1(t)+\frac{1}{4}P_2(t)+\frac{1}{4}P_3(t) \\ P_2'(t) &= \frac{1}{3}P_1(t)-\frac{1}{2}P_2(t)+\frac{1}{12}P_3(t) \\ P_3'(t) &= \frac{2}{3}P_1(t)+\frac{1}{4}P_2(t)-\frac{1}{3}P_3(t). \end{aligned} \tag{19}$$

287

马尔可夫过程的稳定状态分布相应于微分方程组的稳定状态解. 对于所有的 i 令 $P_i'=0$，我们得到

$$\begin{aligned} 0 &= -P_1+\frac{1}{4}P_2+\frac{1}{4}P_3 \\ 0 &= \frac{1}{3}P_1-\frac{1}{2}P_2+\frac{1}{12}P_3 \\ 0 &= \frac{2}{3}P_1+\frac{1}{4}P_2-\frac{1}{3}P_3. \end{aligned} \tag{20}$$

将这个方程组(20)与条件

$$P_1+P_2+P_3=1$$

联立求解线性方程组得到

$$P \doteq \left(\frac{7}{35},\frac{8}{35},\frac{20}{35}\right).$$

这与前面的结论相同.

确定表示一个马尔可夫过程是稳定状态分布的方程组的一种简便方法是使用流体流动的类比. 流体流入或流出每个状态. 为使系统保持平衡，流体流入每个状态的速率一定等于流体流出该状态的速率. 例如，在图 8-7 中我们有流体从状态 1 流出的速率为 $1/3+2/3=1\times P_1$. 流体从状态 2 流回到状态 1 的速率为 $1/4\times P_2$ 同时从状态 3 流回到状态 1 的速率为 $1/4\times P_3$，于是我们有条件

$$P_1=\frac{1}{4}P_2+\frac{1}{4}P_3.$$

将[流出]=[流入]的原理应用于另两个状态也一样，于是得到了方程组

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{4}P_2+\frac{1}{4}P_3 \\ \frac{1}{2}P_2 &= \frac{1}{3}P_1+\frac{1}{12}P_3 \\ \frac{1}{3}P_3 &= \frac{2}{3}P_1+\frac{1}{4}P_2, \end{aligned} \tag{21}$$

它相当于方程组(20). 我们称方程组(21)为我们的马尔可夫过程模型的平衡方

程. 他们表示了每个状态流入速率和流出速率平衡的条件.

在8.1节我们提到了一个遍历的马尔可夫链将总是趋于稳定状态的结论. 现在我们将论述对于马尔可夫过程相应的结果. 一个马尔可夫过程如果对于每一对状态 i 和 j 都可能通过有限步的转移从状态 i 跳到状态 j，该马尔可夫过程被称为是*遍历的*. 这里有一个定理保证了一个遍历的马尔可夫过程总会趋近于稳定的状态. 进而，X_t 的分布趋近于相同的稳定状态分布且与系统的初始状态无关.（参见[Cinlar，1975]，p. 264.）令 288

$$P(t)=(P_1(t),\cdots,P_m(t))$$

表示马尔可夫过程当前的概率分布. 则这个定理说的是对于状态空间任何的初始概率分布 $P(0)$，我们将总可以看到当 $t\to\infty$ 时，马尔可夫过程状态向量 X_t 的概率分布 $P(t)$ 将收敛于相同的稳定状态分布

$$P=(P_1,\cdots,P_m)$$

描述概率分布 $P(t)$ 动态性质的微分方程组(18)可以被写成矩阵的形式

$$P(t)'=P(t)A, \tag{22}$$

其中 $A=(a_{ij})$ 是速率矩阵. 他是在空间

$$S=\{x\in\mathbb{R}^m:0\leqslant x_i\leqslant 1;\sum x_i=1\}. \tag{23}$$

上的线性微分方程组. 我们的定理说的是如果动态系统(22)表示一个遍历的马尔可夫过程，则一定存在惟一的稳定的平衡解 P. 进而，对于任何的初始条件 $P(0)$ 我们将有当 $t\to\infty$ 时，$P(t)\to P$. 关于马尔可夫过程(时间依赖的)瞬时性质的更详细的信息可以通过使用通常的方法显式地求解线性方程组(22)得到.

现在我们回到例8.3的铲车问题. 我们希望关于在 t 个月的时间内修理的铲车的数量 X_t 组建一个马尔可夫过程的模型. 因为工厂仅仅可以存放27辆铲车，我们有 289

$$X_t\in\{0,1,2,\cdots,27\}$$

问题所允许发生的转移仅仅是从 $X_t=i$ 到 $X_t=i+1$ 或 $i-1$. 除去我们不能从状态27向上转移和不能从状态0向下转移之外，向上和向下转移的速率分别是 $\lambda=4.5$ 和 $\mu=7.3$. 这个问题的速率图表示于图8-8.

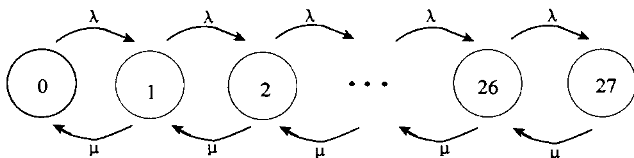


图8-8 铲车问题的速率图，图中的速率是待修铲车的数量趋于增加和减少的概率

稳定状态方程 $PA=0$ 能够使用

$$[流出率]=[流入率]$$

的原理从速率图得到. 从图 8-8 我们得到

$$\begin{aligned}
\lambda P_0 &= \mu P_1 \\
(\mu+\lambda)P_1 &= \lambda P_0 + \mu P_2 \\
(\mu+\lambda)P_2 &= \lambda P_1 + \mu P_3 \\
&\vdots \\
(\mu+\lambda)P_{26} &= \lambda P_{25} + \mu P_{27} \\
\mu P_{27} &= \lambda P_{26}.
\end{aligned} \tag{24}$$

与

$$\sum P_i = 1$$

联立求解将得到稳定状态 $\Pr\{X_t=i\}$. 我们关心

$$\Pr\{X_t > 0\} = 1 - \Pr\{X_t = 0\} = 1 - P_0$$

290 和

$$EX_t = \sum iP_i.$$

进行到第四步，我们首先依据 P_0 求解 P_1，然后依据 P_1 求解 P_2，等等，对于所有的 $n=1, 2, 3, \cdots, 27$ 得到

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)P_{n-1}$$

则对于所有的 n 有

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0$$

因为

$$\sum_{n=0}^{27} P_n = P_0 \sum_{n=0}^{27}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = 1,$$

我们一定有

291

$$P_0 = \frac{(1-\rho)}{(1-\rho^{28})},$$

其中 $\rho=\lambda/\mu$. 这里我们使用了有限项几何级数求和的公式. 对于 $n=1, 2, 3, \cdots, 27$ 我们有

$$P_n = \rho^n P_0 = \frac{\rho^n(1-\rho)}{1-\rho^{28}}. \tag{25}$$

现在 $\rho=\lambda/\mu=4.5/7.3\approx0.616$，于是 $1-\rho^{28}\approx0.9999987$. 因此，对于实用的目的，我们可以假设 $P_0=1-\rho$ 和对于所有的 $n\geqslant1$，$P_n=\rho^n(1-\rho)$.

现在我们计算出两个指标的数值. 首先，我们有

$$\Pr\{X_t > 0\} = 1 - P_0 = \rho \approx 0.616.$$

其次我们有

$$EX_t = \sum_{n=0}^{27} nP_n$$
$$= \sum_{n=0}^{27} n\rho^n(1-\rho), \tag{26}$$

由此可以得到 $EX_t = 1.607$.

概括来说(步骤五)，我们考虑一个系统，其中铲车以每月 4.5 台的速率损坏，同时被送到具有每月能修理 7.3 台铲车的修理厂修理. 因为铲车送修理厂的速率仅仅大约是修理厂潜在的修理能力的 60%，修理工人忙于这一工作仅仅大约是 60%的时间. 然而，铲车的损坏实质上是随机的，有时既使修理工没有误工也会出现在同一时间有多辆铲车停在修理厂的情形. 事实上，平均一天我们将期望在修理厂看到 1.6 辆铲车. 对于这一点，我们是说如果我们每天跟踪在修理厂的铲车的数量，则到年底这些数的平均大约是 1.6. 更详细地，我们期望有图 8-9 所示的分布.

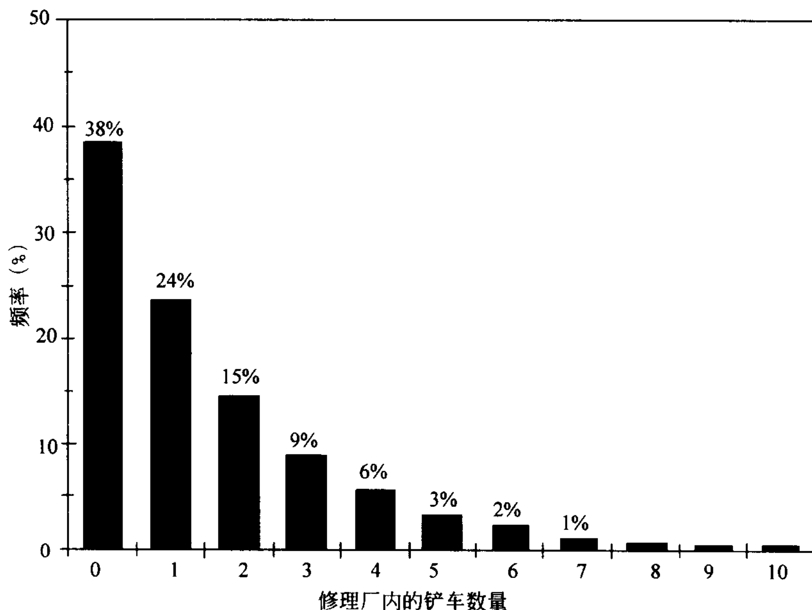


图 8-9 表示任何时间维修的铲车数量的分布的直方图

Murphy 法则在这里确实是个证据. 既使工人是努力工作的，一年工作日的 8%仍将有 5 辆或更多的铲车留在了修理厂. 因为每 3 天修理一辆铲车，这表明大约是三周的积压量. 假设一年 250 个工作日，这个不幸的状况一年内大约出现 20 天. 同时，一项时间的研究将表明修理工人忙于这部分工作大约 60%的时间. 292 这个矛盾可以用如下简单的事实来解释，即铲车的损坏不总是保持均匀的间隔. 有时，纯粹由于运气太坏，几台铲车接连损坏，使得修理工应接不暇. 另一些时

候两次坏车之间的时间间隔很长，修理工们又没有工作可做.

这里实际上有两个管理的问题. 一个是闲散时间的问题. 这里没有办法回避这种工作的时有时无的特征，闲散时间的延续是非常值得关心的. 经理也许会考虑在闲散的时间安排工人去做其他的工作，这些工作应该是在损坏的铲车到来时很容易被停止的.

第二个问题是工作的积压. 有时会有几辆铲车在等待修理. 这时确定是不是在繁忙的时间提出增派劳动力进行修理的工作这一问题是需要研究的.（这个问题是本章末习题 7 的问题.）

最后，我们讨论非常重要的灵敏性和稳健性的问题. 这两个特性的度量依赖于比值

$$\rho=\frac{\lambda}{\mu},$$

当前它等于 0.616. 关系式

$$\Pr\{X_t>0\}\approx\rho \tag{27}$$

无须进一步的解释. 如果我们令 $A=EX_t$ 表示系统的平均数，则(使用 $1-\rho^{28}\approx 1$)我们有

$$A=\sum_{n=0}^{27}n\rho^n(1-\rho), \tag{28}$$

可以化简为

$$A=\rho+\rho^2+\rho^3+\cdots+\rho^{27}-27\rho^{28}.$$

近似地有

$$\rho(1+\rho+\rho^2+\rho^3+\cdots)=\frac{\rho}{(1-\rho)},$$

于是得

[293]

$$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}\rho}\approx\frac{1}{(1-\rho)^2},$$

同样有

$$S(A,\rho)\approx 2.6.$$

关于 ρ 的小的误差不会明显地影响我们基于 $A=EX_t$ 的结论.

我们同样考虑工厂存储面积的大小，当前是 $K=27$ 台铲车. 我们看到对于中等大小的 ρ(不是特别接近于 1)，当我们继续使用近似公式

$$1-\rho^{K+1}\approx 1.$$

时，这个参数的差别很小. 这个近似相当于假设这里对于待修的铲车有无限的存储能力. 实际上是假设 $K=\infty$. 如果增加更多的存储能力，它并不会改变待修铲车的到达率 λ. 于是参数 $\rho=\lambda/\mu$ 将保持不变，工厂性能的两个指标对于 K 是不灵敏的. 增加 K(即，开辟更多的存储空间)的效果仅仅是增加了可等待修理的铲车的数量.

我们用以描述修理厂的模型是排队模型的特殊情形. 一个排队模型描述的是一个包含一个或几个用以为到来的顾客服务的设施的系统，这些到达的顾客当他们没有接受到服务时需要排队等候服务. 关于排队的模型有大量的文献，包括相当近代的研究. 关于运筹学的教科书(例如：[Hillier 和 Lieberman，1990])对于初学者来说是合适的. 我们打算放宽的最重要的假设是服务时间服从指数分布. 我们有足够的理由怀疑顾客到达的随机性. 基于我们前面给出的假设 $K=\infty$，对于具有方差 σ^2 的一般的服务时间的分布表明 $\rho=\lambda/\mu$ 是服务台繁忙的概率同时稳定状态

$$EX_t = \frac{\rho + \lambda^2\sigma^2 + \rho^2}{2(1-\rho)}. \tag{29}$$

在指数服务时间的情形下它可以化简为 $\rho/(1-\rho)$ 这时 $\sigma=1/\mu$，从这个公式可以得到一般的结论：随着服务时间的方差的增加，等待修理的车辆的平均数将会增加. 于是，关于修理时间的不确定性将会导致更长的等待时间.

294

8.3 线性回归

一个最普遍使用的随机模型是假设状态变量的期望值是时间的线性函数. 这个模型之所以是引人注目不仅是因为它应用的范围很广，还因为有很好的软件工具.

例 8.5 私人家庭可调节的抵押贷款率(ARM，Adjustable-rate mortgages)通常是基于由联邦家庭贷款银行制定的若干市场指数之一确定的. 贷款者的抵押贷款是依据每年五月一年期的美国公债到期的指数(CM1，Constant Maturity index)来调节的. 从 1986 年六月开始的三年期间的历史资料列于表 8-1(来源：美国联邦储备委员会). 使用这些信息给出下一次调节时，即 1990 年五月这个指数的估计值.

表 8-1 可能的抵押贷款调节率指数

	TB3	*TB6*	*CM1*	*CM2*	*CM3*	*CM5*
6/86	6.21	6.28	6.73	7.18	7.41	7.64
7/86	5.84	5.85	6.27	6.67	6.86	7.06
8/86	5.57	5.58	5.93	6.33	6.49	6.80
9/86	5.19	5.31	5.77	6.35	6.62	6.92
10/86	5.18	5.26	5.72	6.28	6.56	6.83
11/86	5.35	5.42	5.80	6.28	6.46	6.76
12/86	5.49	5.53	5.87	6.27	6.43	6.67
1/87	5.45	5.47	5.78	6.23	6.41	6.64
2/87	5.59	5.60	5.96	6.40	6.56	6.79
3/87	5.56	5.56	6.03	6.42	6.58	6.79
4/87	5.76	5.93	6.50	7.02	7.32	7.57
5/87	5.75	6.11	7.00	7.76	8.02	8.26
6/87	5.69	5.99	6.80	7.57	7.82	8.02
7/87	5.78	5.86	6.68	7.44	7.74	8.01

(续)

	$TB3$	$TB6$	$CM1$	$CM2$	$CM3$	$CM5$
8/87	6.00	6.14	7.03	7.75	8.03	8.32
9/87	6.32	6.57	7.67	8.34	8.67	8.94
10/87	6.40	6.86	7.59	8.40	8.75	9.08
11/87	5.81	6.23	6.96	7.69	7.99	8.35
12/87	5.80	6.36	7.17	7.86	8.13	8.45
1/88	5.90	6.31	6.99	7.63	7.87	8.18
2/88	5.69	5.96	6.64	7.18	7.38	7.71
3/88	5.69	5.91	6.71	7.27	7.50	7.83
4/88	5.92	6.21	7.01	7.59	7.83	8.19
5/88	6.27	6.53	7.40	8.00	8.24	8.58
6/88	6.50	6.76	7.49	8.03	8.22	8.49
7/88	6.73	6.97	7.75	8.28	8.44	8.66
8/88	7.02	7.36	8.17	8.63	8.77	8.94
9/88	7.23	7.43	8.09	8.46	8.57	8.69
10/88	7.34	7.50	8.11	8.35	8.43	8.51
11/88	7.68	7.76	8.48	8.67	8.72	8.79
12/88	8.09	8.24	8.99	9.09	9.11	9.09
1/89	8.29	8.38	9.05	9.18	9.20	9.15
2/89	8.48	8.49	9.25	9.37	9.32	9.27
3/89	8.83	8.87	9.57	9.68	9.61	9.51
4/89	8.70	8.73	9.36	9.45	9.40	9.30
5/89	8.40	8.39	8.98	9.02	8.98	8.91
6/89	8.22	8.00	8.44	8.41	8.37	8.29

我们将使用五步方法．步骤一是提出问题．我们企图去估计描述具有随机波动的随时间而增长的变量将来的变化趋势．令 X_t 表示在 1986 年 5 月以后第 $t+1$ 月的一年期美国公债到期的指数．图 8-10 给出了 $t=1$，…，37，时 X_t 的散点图．我们希望估计 X_{48}．如果我们假设 X_t 部分地依赖于随机元素，则我们不能期望精确地预测 X_{48}．最好的是得到平均值和不确定性大小的某种度量．目前我们将专注于得到 EX_{48} 的估计．我们将把其他的内容放在灵敏性分析的那一节去讨论．

步骤二是选择建模的方法．我们将使用线性回归的方法组建这个模型．

295～296

线性回归模型假设

$$X_t = a + bt + \varepsilon_t, \tag{30}$$

其中 a 和 b 是实常数，同时 ε_i 是表示随机波动效应的随机变量．假设

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \cdots$$

是独立，同分布的且具有零均值．同样一般假设 ε_i 是正态的，也就是对于某个 $\sigma>0$ 随机变量

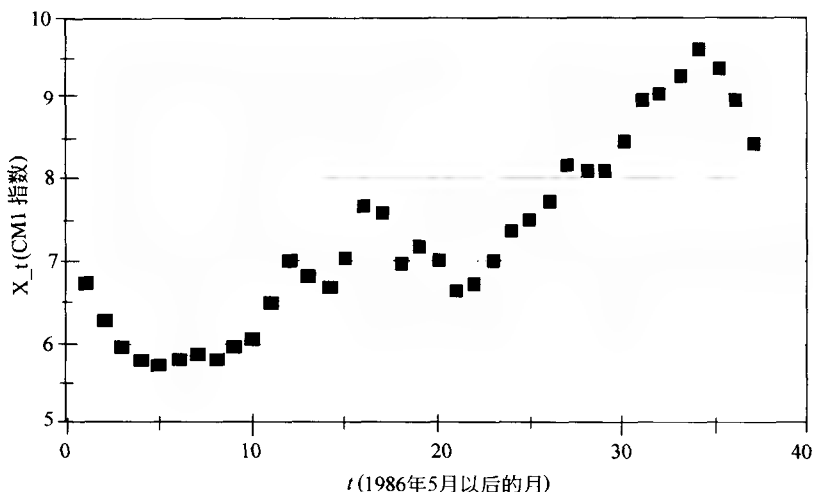


图 8-10 对于 ARM 问题 CM1 指数与时间的散点图

$$\frac{\varepsilon_t}{\sigma}$$

服从标准的正态分布．在由 ε_t 表示的随机波动是相当大量的随机因子相加的结果的情形下，这个正态性的假设被中心极限定理证明是正确的．（正态密度和中心极限定理在 7.3 节作了介绍．）

因为误差项有零均值，

$$EX_t = a + bt, \tag{31}$$

估计 EX_t 的问题就化为估计参数 a 和 b 的问题了．如果我们在图 8-10 上画出直线

$$y = a + bt \tag{32}$$

我们希望资料点（CM1 图上的小方块）处于这条直线的附近，某些在上面，某些在下面．由我们的参数 a 和 b 的最优估计所表示的最佳的拟合直线将极小化资料点与直线之间的离差的大小． 297

给定一组资料点

$$(t_1, y_1), \cdots, (t_n, y_n),$$

我们使用资料点 (t_i, y_i) 和回归直线(32)上 $t=t_i$ 的点之间的垂直距离

$$|y_i - (a + bt_i)|$$

度量回归线的拟合优度．为了避免绝对值符号在优化问题上带来的麻烦，我们使用

$$F(a,b) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - (a + bt_i))^2. \tag{33}$$

来度量整体的拟合优度. 最佳的拟合直线将由目标函数(33)的全局最小值所表征. 令偏导数 $\partial F/\partial a$ 和 $\partial F/\partial b$ 等于零得到

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n} y_i &= na + b\sum_{i=1}^{n} t_i \\ \sum_{i=1}^{n} t_i y_i &= a\sum_{i=1}^{n} t_i + b\sum_{i=1}^{n} t_i^2.\end{aligned} \tag{34}$$

关于两个未知参数 a 和 b 求解这两个线性方程

回归方程(32)预测的效率的估计能够如下得到. 令

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{35}$$

表示资料点 y 的平均值，同时对于每个 i 令

$$\hat{y}_i = a + bt_i. \tag{36}$$

298 一个资料点与平均值之间的全部的变化 $y_i - \bar{y}$ 能够被表示为如下的和式

$$(y_i - \bar{y}) = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}). \tag{37}$$

式(37)右端的第一项表示误差(资料点距回归线的垂直距离)，第二项表示在回归线上 y 的改变量. 简单的代数变换可以看出

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2. \tag{38}$$

统计量

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{39}$$

度量了在全部的变化中由回归线解释的部分. 总变差中剩余的部分是随机误差也就是 ε_i 的影响的贡献. 如果 R^2 接近于 1，则资料点非常接近直线. 如果 R^2 接近于 0，资料点就很接近于随机.

许多大型的计算机都装有统计分析的软件包，它可以从资料集中自动地计算 a，b 和 R^2. 对于许多个人计算机同样类型的价格便宜的软件也是可用的，同样某些手持计算器也有内置的线性回归函数. 对于本书中的线性回归问题，这些方法中的任何一个都是足够的. 我们不建议用手算来解决这些问题.

步骤二是组建模型. 我们将令 X_t 表示 1986 年 5 月后第 t 月 CM1 指数的值，同时我们将假设模型为(30)式给出的线性回归模型. 资料是

$$\begin{aligned}(t_1, y_2) &= (1, 6.73) \\ (t_2, y_2) &= (2, 6.27) \\ &\vdots \\ (t_{37}, y_{37}) &= (37, 8.44).\end{aligned} \tag{40}$$

最优拟合的直线是通过求解线性方程组(34)来求出 a 和 b 得到. 拟合优度统计量

R^2 能够由(39)式得到. 使用这个线性回归模型的计算工具将使我们避免了大量繁杂的计算.

步骤四是求解这个模型. 我们使用 MINITAB 统计软件包就得到回归直线

$$y = 5.45 + 0.0970t \tag{41}$$

和

299

$$R^2 = 83.0\%.$$

(参见图 8-11.)(41)式给出了穿过资料点(40)的最优的拟合直线. 图 8-12 是它的图像表示. CM1 指数在 1986 年 6 月到 1989 年 6 月的期间内平均每月增长 0.0970. 将 $t=48$ 代入(41)式, 我们得到 1990 年 CM1 指数的估计值为

$$EX_{48} = 5.45 + 0.0970(48) = 10.106$$

因为 $R^2=83.0\%$, 回归方程说明了我们的 CM1 指数总的变化中的 83%. 这就使我们的估计值有相当高的置信水平. 当然, 由于随机波动的原因, X_{48} 的实际值与它还有区别. 关于这个波动的大致规模的更详细的分析将在灵敏性分析中简短地提到.

```
set c1
1:37
end
set c2
6.73 6.27 5.93 5.77 5.72 5.80 5.87 5.78 5.96 6.03 6.50 7.00
6.80 6.68 7.03 7.67 7.59 6.96 7.17 6.99 6.64 6.71 7.01 7.40
7.49 7.75 8.17 8.09 8.11 8.48 8.99 9.05 9.25 9.57 9.36 8.98 8.44
end
regress c2 on 1 predictor c1;
predict 48.

The regression equation is
C2 = 5.45 + 0.0970 C1

Predictor        Coef       Stdev     t-ratio        P
Constant       5.4475      0.1615       33.73    0.000
C1           0.096989    0.007409       13.09    0.000

s = 0.4812       R-sq - 83.0%     R-sq(adj) = 82.6%

Analysis of Variance

SOURCE       DF          SS          MS          F         P
Regression    1      39.678      39.678     171.35     0.000
Error        35       8.104       0.232
Total        36      47.783

Unusual Observations
Obs.       C1        C2        Fit  Stdev.Fit    Residual    St.Resid
  1       1.0    6.7300     5.5445     0.1551      1.1855       2.60R

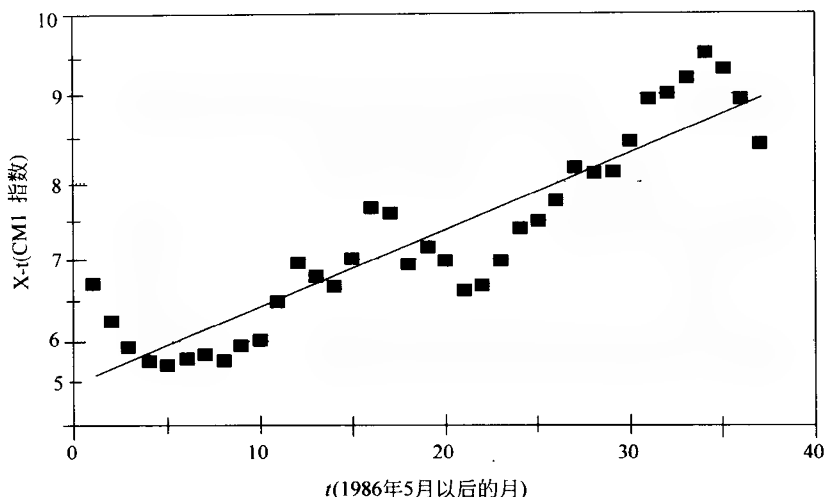
R denotes an obs. with a large st. resid.

     Fit  Stdev.Fit          95% C.I.            95% P.I.
 10.1030     0.2290    ( 9.6380,10.5679)  ( 9.0209,11.1851) X

X  denotes a row with X values away from the center
```

图 8-11 使用统计软件包 MINITAB 求解 ARM 问题

300



301

图 8-12　对于 ARM 问题 CM1 指数随时间变化图及回归直线

最后我们完成步骤五．我们得到了关于 CM1 指数每月增长大约 0.097 点的一般的趋势．这个数字是基于最后三年的历史观测得到的．基于这一点我们得到 1990 年 5 月指数的估计值为 10.11．它大约要比 1989 年 5 月高出 1.1 个点，于是在 1990 年贷款者应估计到他的 ARM 支出还要增加．

这里最重要的灵敏性分析问题是 X_t 的随机波动量．我们假设在(30)中的线性回归模型中 ε_t 服从均值为零的正态分布．我们的回归软件包基于这些资料估计的标准差 $\sigma\approx0.4812$．换句话说，$\varepsilon_t/0.4812$ 近似于标准正态．大约 95％的资料点不会在直线(41)$\pm2\sigma$ 之外．如果它表示了将来波动的大小，则我们有 95％的信度期望 X_{48} 应介于 $10.106\pm2\sigma$ 之间，即，有

$$9.14\leqslant X_{48}\leqslant 11.07.$$

在统计软件包中还有更精细的方法，它考虑包含在估计值 EX_{48} 内的附加的不确定性．这个方法得到在 95％的置信水平下有 $9.02\leqslant X_{48}\leqslant11.19$．参见图 8-11．

下面我们考虑模型对于非正常的资料值的灵敏性．我们假设线性模型由(30)式给出．多数时间随机误差将是很小的，但是仍然存在小的概率使得有误差较大的数值，于是我们的资料中一个或更多的点位于远离回归线的位置．需要考虑我们的算法对于这样的(称之为*远离点的*)异常点的灵敏性．

不难看到，对于资料集(t_1, y_1)，…，(t_n, y_n)的回归线将总是通过点$(\bar{t}, \bar{y})$，

$$\bar{t}=\frac{t_1+\cdots+t_n}{n}$$

$$y = \frac{y_1 + \cdots + y_n}{n}. \tag{42}$$

在我们的模型中，有 $\bar{t}=19$ 和 $y=7.29$. 回归的程序选择了通过点(19，7.29)的最优的拟合直线. 因为程序的实质是最小化回归线和资料点之间的垂直距离，不管其他资料点的位置，一个远离点将有将回归线拉向它自己的趋势. 当 n 很小时，状况将会更坏，因为每一个单个的资料点将有更大的影响. 同样当它与基础点($\bar{t}$，$\bar{y}$)的距离加大时也会更坏，因为越是远离回归线影响就越大.

在图 8-11 中统计软件包 MINITAB 标明资料点(1，6.73)作为非正常点. 如果我们将 $t=1$ 代入回归方程，得到

$$\hat{y}_1 = 5.45 + 0.0970(1) = 5.547.$$

垂直距离或剩余量 $y_1 - \hat{y}_1$ 是 1.18，这就意味着这个资料点在回归线上大约 2.6 个标准差. 为了确定我们的模型对远离点的灵敏性，我们删去资料点(1，6.73)重复回归的计算图 8-13 显示了这个灵敏性分析的结果.

302

```
set c1
2:37
end
set c2
6.27 5.93 5.77 5.72 5.80 5.87 5.78 5.96 6.03 6.50 7.00
6.80 6.68 7.03 7.67 7.59 6.96 7.17 6.99 6.64 6.71 7.01 7.40
7.49 7.75 8.17 8.09 8.11 8.48 8.99 9.05 9.25 9.57 9.36 8.98 8.44
end
regress c2 on 1 predictor c1;
predict 48.

The regression equation is
C2 = 5.30 + 0.103 C1

Predictor         Coef        Stdev     t-ratio        P
Constant        5.3045       0.1554       34.13    0.000
C1            0.102634     0.007034       14.59    0.000

s = 0.4385        R-sq = 86.2%     R-sq(adj) = 85.8%

Analysis of Variance

SOURCE        DF          SS         MS          F         P
Regression     1      40.924     40.924     212.88     0.000
Error         34       6.536      0.192
Total         35      47.460

     Fit  Stdev.Fit        95% C.I.            95% P.I.
 10.2309     0.2134    ( 9.7972,10.6647) ( 9.2397,11.2221) X

X  denotes a row with X values away from the center
```

图 8-13　使用统计软件包 MINITAB 对 ARM 问题的灵敏性分析

新的回归方程是

$$EX_t = 5.30 + 0.103t$$

$R^2=86.2\%$. 预测值为 $EX_{48}=10.24$，95%的预测区间为

303

$$9.24 \leqslant X_{48} \leqslant 11.22.$$

它大致与前面相同，因此，结论是我们的模型对于远离点不是十分敏感.

主要的稳健性来源于我们的线性模型(30)的选择. 更一般的，我们可以假设

$$X_t = f(t) + \varepsilon_t, \tag{43}$$

其中 $f(t)$ 表示一年期的美国基金债券在时间 t 的真实价值，同时 ε_t 表示市场的波动值. 在这个更一般的情形下线性回归模型表示了 $f(t)$ 的线性近似

$$f(t) \approx a + bt, \tag{44}$$

且在基础点$(\bar{t}, \bar{y})$近似度很高. 在图 8-11 和图 8-13 中 MINITAB 标明 $t=48$ 的点作为远离中心 $t=19$ 的点. 对于 $1 \leqslant t \leqslant 37$ 我们有资料和在这个区间上线性关系的强有力的证据($R^2=83\%$). 换句话说，线性近似至多在这个区间上包含有一个小的百分数的误差. 然而，当我们从这个区间移出时，肯定会增大这个线性关系所包含的误差.

我们的线性回归模型是时间序列模型的简单的例子. 时间序列模型是随时间变化的一个或多个变量的随机模型. 许多经济学的预报可以用时间序列模型处理. 更复杂的时间序列模型描述了几个变量的交互作用和这些变量的随机波动的独立性. 时间序列分析是统计学的一个分支. 开始学习更多的时间序列的模型可以阅读书籍[Box 和 Jenkins，1976].

8.4 习题

1. 再次考虑例 8.1 的存货问题，但是现在假设商店的策略是如果在周末存货少于两个水族箱就进更多的水族箱. 在这两种情况下(还剩下零个或一个)商店将进足够的货使得水族箱的存货总数恢复到三个.

304

   (a)计算在给定的一周内对于水族箱的需求超过供给的概率. 使用五步方法和稳定状态的马尔可夫链模型.

   (b)对于需求率 λ 作灵敏性分析. 假设 $\lambda=0.75$，0.9，1.0，1.1 和 1.25 计算需求超过供给的稳定状态概率，同时像图 8-5 那样以图的形式表示出来.

   (c)令 p 表示需求超过供给的稳定状态概率. 使用(b)的结果去估计 $S(p, \lambda)$.

2. (需用计算机代数系统)再次考虑例 8.1 的存货问题. 在这个问题中我们将探讨需求超过供给的概率 p 对需求率 λ 的灵敏性.

   (a)画出对任意的 λ 的状态转移的流程图. 表明式(11)用于表示这个问题的状态转移概率的矩阵.

   (b)写出类似于(10)的方程组，它是用于对一般的 λ 求解而得到稳定状态的分布. 使用计算机代数系统求解这些方程.

(c)使用(b)的结果用 λ 表示 p 的公式．绘制在范围 $0\leqslant\lambda\leqslant 2$ 下 p 关于 λ 的图像．

(d)使用计算机代数系统对(c)中得到的 p 的公式求导数．计算当 $\lambda=1$ 时精确的灵敏性 $S(p,\lambda)$．

3. 再次考虑例 8.1 的存货问题，但是现在假设存货的策略依赖于近期的销售情况．当存货降到零的时候，进货的数量等于 2 加上过去的一周销售的数量．

(a)在确定需求超过供给的稳定状态概率的同时，还要确定再次供货单的平均大小．使用五步方法和马尔可夫链模型．

(b)现在假设一个较弱的需求是每周平均两个顾客的泊松分布，重复(a)的分析．

4. 再次考虑例 8.1 的存货问题，但是现在假设如果在周末存货少于两个水族箱就进三个新的水族箱．

(a)确定在任意给定的一周内需求超过供给的概率．使用五步方法和稳定状态的马尔可夫链模型．

(b)使用(a)中的稳定状态概率计算在这个存货的策略下每周销售的水族箱的期望数值．

(c)对于例题 8.1 的进货策略重复(b)的计算．

(d)假设商店每出售一个 20 加仑的水族箱获得利润 \$5．实行新的存货策略商店会获利多少？

5. 我们考虑股票市场，有三种状态：1．熊市，2．强牛市，3．弱牛市．从历史上看，当市场分别处于状态 1、2 和 3 时，一类合作基金的年收益分别是 3%、28%和 10%．假设状态转移概率矩阵

$$P=\begin{pmatrix}0.90 & 0.02 & 0.08\\ 0.05 & 0.85 & 0.10\\ 0.05 & 0.05 & 0.90\end{pmatrix}$$

应用于股票市场每周的状态转换．

(a)确定市场的稳定状态分布．

(b)假设将 \$10 000 投资于这个基金 10 年．确定期望的总利润．状态转移的顺序会不会发生什么变化？　[305]

(c)在最坏的情形下，每个状态持续的期望时间比例分别是 40%、20%和 40%．对(b)的答案有什么影响？

(d)在最好的情形下，每个状态持续的期望时间比例分别是 10%、70%和 20%．对(b)的答案有什么影响？

(e)这个合作基金是否比当前利率大约为 8%的货币市场基金提供了较好的投资的机会？考虑到货币市场基金具有较低的风险．

6. 这个习题叙述了马尔可夫过程模型的两个公式的等价性．

(a)假设 T_{i1}，…，T_{im} 是独立的随机变量，同时 T_{ij} 服从比率参数 $a_{ij}=p_{ij}\lambda_i$ 的指数分布．假设 $\sum p_{ij}=1$ 和 $\lambda_i>0$．证明

$$T_i = \min(T_{i1},\cdots,T_{im})$$

服从速率参数为 λ_i 的指数分布．[提示：对所有的 $x>0$ 使用事实

$$\Pr\{T_i > x\} = \Pr\{T_{i1} > x,\cdots,T_{im} > x\}]$$

306

(b)假设 $m=2$，则 $T_i=\min(T_{i1}, T_{i2})$，证明 $\Pr\{T_i=T_{i1}\}=p_{i1}$．[提示：使用事实

$$\Pr\{T_i = T_{i1}\} = \Pr\{T_{i2} > T_{i1}\} = \int_0^{\infty}\Pr\{T_{i2} > x\}f_{i1}(x)dx,$$

其中 $f_{i1}(x)$ 是随机变量 T_{i1} 的概率密度函数.]

(c)使用(a)和(b)的结果证明在一般的情形下 $\Pr\{T_i=T_{ij}\}=p_{ij}$．

7．再次考虑例 8.3 的铲车问题，但是现在假设当两辆或更多的铲车需要修理时第二个技工将被召来．

(a)使用五步方法和马尔可夫过程模型确定需要修理的铲车的数量的稳定状态分布．

(b)使用(a)的结果计算在修理厂的铲车的稳定状态的期望数量，第一个技工繁忙的概率，和第二个技工被召来的概率．将你的答案与例 8.3 中关于一个技工的结论进行比较．

(c)第二个技工的费用是每天 \$250，同时技工是每天按工作付钱．在铲车积压(两量或更多)的情况下，另一个选择是为顾客租一辆铲车为代用品，他的铲车仍然等待修理，这时每辆车每周的费用是 \$125．这两个方案哪一个更合算？

(d)关于在铲车积压的期间内召来第二个技工的实际花费有一些不确定性．第二个技工每天最小的费用是多少，这个费用可以租用一台较好的代用的铲车．

8．有五个地点由无线电相互联系．无线电的联系有 20％的时间是激活的，在其余的 80％的时间无线电不再活动．主要的地点送出无线电信息平均 30 秒，同时其他的四个地点发送信息平均长度为 10 秒．所有的无线电信息的一半是瞄准主要的地点，其余的部分等分给另外的四个地点．

(a)对于每个地点确定这个场所在任何给定的时间都发送信息的稳定状态概率．使用五步方法，和马尔可夫过程模型．

(b)监测站对这个网络的无线电发射每五分钟抽一次样．平均需要多长时间监测器才能发现从一个特定的地点发出的信息．

(c)如果在监测器听到后信号至少延续 3 秒钟监测器才能够识别无线电信号的来源．要多长时间监测器才能确定一个特定地点的位置．

(d)进行灵敏性分析去了解(c)的结果如何受无线电的百分利用率(当前为20%)的影响.

9. 汽油加油站有两个油泵，每一个可以同时服务两辆汽车. 如果两个泵是繁忙的，汽车将排成一队等待加油. 因为加油站之间的竞争，可以认为顾客一旦遇到这个站排着长队等待加油时，他将选择去另一个加油站.

(a)组建模型，预报等待队伍的稳定状态概率和期望的队长. 使用五步方法和马尔可夫过程模型. 需要给出某些关于顾客的需求，服务时间，和终止等候(拒绝排队)的附加的假设. 307

(b)使用(a)的模型去估计由于顾客终止等候而丧失的潜在的生意的比例. 考虑顾客需求的可能水平的范围.

(c)根据加油站经理获得的资料来判断顾客的需求水平(潜在的销售量)的最容易的方式是什么?

(d)在什么情况下你应该建议加油站再购进一台油泵?

10. 一类单细胞的生物通过细胞分裂繁殖，产生两个子代. 在细胞分裂前的平均寿命是一小时，同时每个细胞在它繁殖之前有10%的机会死亡.

(a)构造描述种群大小随时间的变化的模型. 使用马尔可夫过程，同时画出流程图.

(b)用通俗的语言描述你对这个种群变化的推测.

(c)将稳定状态的结果应用于这个模型的问题是什么?

11. 表 8-2 给出了亚洲 10 个最贫困的国家 1982 年的人均美元的收入和每平方英里人口的密度(资料来源：[Wbster's New World Atlas, 1988]). 308

表 8-2 10 个最贫困的亚洲国家的人均收入和人口密度

国家	1984 年人均收入 $	人口密度(人数/平方英里)
尼泊尔	168	290
柬埔寨	117	101
孟加拉国	122	1740
缅甸	171	139
阿富汗	172	71
不丹	142	76
越南	188	458
中国	267	284
印度	252	578
老挝	325	45

(a)这个资料是否支持如下的命题：国家的富裕是与人口的密度有关? 使用线性回归得到公式，以人口密度的线性函数来预报人均收入.

(b)在人均收入总变化中的多大百分率能够贡献于人口密度的变化.

(c)如果我们去掉每平方英里高于千人的国家(孟加拉国)对(a)和(b)的答案有什么影响?

(d)基于你的回归模型，如果设法使一个国家的人口减少25%，估计这个国家的公民可能得到的收益.

12. 再次考虑习题11(a)，但是是通过手算求解这个最优化问题. 令 t_i 表示国家 i 人口的密度，y_i 为人均收入，对于备选的回归直线

$$y = a + bt$$

拟合的优度由课文的(33)式给出. 结合资料点(t_i，y_i)计算函数 $F(a, b)$. 这时通过对所有的(a，b)最小化 $F(a, b)$就可以得到最佳的拟合直线.

13. 再次考虑例8.5的ARM问题. 假设仅仅知道1986年6月到1988年6月这一期间的数据资料，同时我们试图预报1989年CM1指数的值.

(a)使用计算机或能做线性回归的计算器得到对这分资料的回归直线.

(b)根据(a)的回归模型预报1989年5月CM1指数的值.

(c)对于(a)的模型，R^2 的数值是什么? 你如何解释这个数值?

(d)与1989年CM1指数的实际数值相比较. 预报值接近的情况如何? 它是否在两倍标准差之内?

14. 重复习题13，但是使用表8-1中的TB3指数.

15. 再次考虑例8.5的ARM问题. 使用多重回归的计算机程序通过拟合二次多项式预报CM1的发展趋势. 当你把时间指标 $t=1, 2, 3, \cdots$ 输入一列和CM1资料输入另一列之后，准备另外的一个资料列包含时间指标的二次方 $t^2=1, 4, 9, \cdots$. 多元回归将给出最佳拟合的二次多项式

$$\text{CM1} = a + bt + ct^2,$$

309

同时 R^2 可以和前面一样地被解释. 这个技术被称为多项式最小二乘法.

(a)使用能做多元线性回归的计算器得到以 t 的二次函数预报CM1指数的公式.

(b)使用(a)得到的公式预报1990年5月CM1指数的期望值.

(c)CM1指数总变化的百分之多少能够由使用的这个模型来说明.

(d)将这个多元回归模型的 R^2 值与8.3节所做的进行比较. 哪一个模型给出了最优的拟合.

16. (习题3.2的响应时间公式)一个郊区的社区打算更新消防队的设备. 作为计划过程的一部分，在前一个季度收集了响应时间的数据资料. 平均要用3.2分钟派遣消防队员. 这个派遣时间变化很小. 消防队员到达火灾现场的时间(行车时间)变化很大，它依赖于火灾现场的距离. 行车时间的数据列于表8-3

(a)使用线性回归得到用行车距离的线性函数预报行车时间的公式. 然后确定全部响应时间(包括派遣时间)的公式.

(b)行车时间全部变化的多大百分率可以由(a)中得到的公式解释?

(c)画出关于表 8-3 所列的资料行车时间与距离的散点图. 这些资料点是否显示出一条直线的趋势?

(d)在(c)中得到的图上画出(a)中得到的回归直线. 这条直线是否是资料的好的预报者?

表 8-3 关于设备位置问题的响应时间资料

距离(英里)	行车时间(分)	距离(英里)	行车时间(分)
1.22	2.62	3.19	4.26
3.48	8.35	4.11	7.00
5.10	6.44	3.09	5.49
3.39	3.51	4.96	7.64
4.13	6.52	1.64	3.09
1.75	2.46	3.23	3.88
2.95	5.02	3.07	5.49
1.30	1.73	4.26	6.82
0.76	1.14	4.40	5.53
2.52	4.56	2.42	4.30
1.66	2.90	2.96	3.55
1.84	3.19		

17. (习题 16 的继续)得到行车时间 d 与距离 r 的关系的另一个方式是使用指数(应为幂函数—译者)模型. 假设 d 和 r 之间的关系有形式 $d=ar^b$. 两端取对数得到

$$\ln d = \ln a + b \ln r.$$

则在这个线性方程中可以应用线性回归估计参数 $\ln a$ 和 b.

(a)在表 8-3 中对行车时间 d 和距离 r 两者取对数作数据变换. 绘制 $\ln d$ 对 $\ln r$ 的散点图. 这个图是否提示了 $\ln d$ 和 $\ln r$ 之间的线性关系? 310

(b)使用线性回归得出用 $\ln r$ 的线性函数预报 $\ln d$ 的公式. 然后, 确定全部响应时间(包括派遣时间)作为到火灾现场的距离 r 的函数的公式. 将其与例 3.2 的公式进行比较.

(c)对于(b)中你的回归模型 R^2 的值是什么? 你如何解释这个数?

(d)画出行车时间 d 和距离 r 的散点图, 同时大致描绘在(b)中得到的 d 作为 r 的函数的草图. 这个指数模型是否对这个资料给出了更好的拟合?

(e)将(c)和(d)中得到的结果与习题 16 的结果做比较. 哪一个模型对资料给出了更好的拟合? 验证你的答案. 311

8.5 进一步的阅读文献

Arrow, K., Karlin, S., and Scarf, H. (1958). *Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production*, Stanford University Press, Stanford, CA.

Billingsley, P. (1979). *Probability and Measure*, Wiley, New York.

Box, G. and Jenkins, G. (1976). *Time Series Analysis, Forecasting, and Control*, Holden–Day, San Francisco.

Cinlar, E. (1975). *Introduction to Stochastic Processes*, Prentice–Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Cornell, R., Flora, J., and Roi, L. *The Statistical Evaluation of Burn Care*, UMAP module 553.

Freedman, D., Pisani, R., and Purves, R. (1978). *Statistics*, W. W. Norton, New York.

Giordano, M., Jaye, M., and Weir, M. *The Use of Dimensional Analysis in Mathematical Modeling*, UMAP module 632.

Giordano, F., Wells, M., and Wilde, C. *Dimensional Analysis*, UMAP module 526.

Hillier, F. and Lieberman, G. (1990). *Introduction to Operations Research*, 5th ed., Holden–Day, Oakland, CA.

Hogg, R. and Tanis, E. (1988). *Probability and Statistical Inference*, Macmillan, New York.

Huff, D. (1954). *How to Lie with Statistics*, W. W. Norton, New York.

Kayne, H. *Testing a Hypothesis: t-Test for Independent Samples*, UMAP module 268.

Keller, M. *Markov Chains and Applications of Matrix Methods: Fixed-Point and Absorbing Markov Chains*, UMAP modules 107 and 111.

Knapp, T. *Regression toward the Mean*, UMAP module 406.

Meerschaert, M. and Cherry, W. P. (1988). Modeling the Behavior of a Scanning Radio Communications Sensor, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 35, 307–315.

Travers, K. and Heeler, P. *An Iterative Approach to Linear Regression*, UMAP module 429.

312

Yates, F. *Evaluating and Analyzing Probabilistic Forecasts*, UMAP module 572.

第9章　概率模型的模拟

最优化问题的计算方法是重要的，因为许多最优化的问题非常难于解析地解出来. 对于动态模型，通常人们能够解析地确定稳定状态的行为，但是，关于瞬时(时变的)行为的研究就需要计算机模拟. 概率模型更加复杂. 不具有时间动态特性的模型有时能够解析地求解出来，同时对于简单的随机模型稳定状态的结果是可用的. 但是对于许多情况，概率模型是用模拟的办法解出的. 这一章我们将讨论概率模型中某些最通常使用的模拟方法.

9.1　蒙特卡罗模拟

随机过程中包含有瞬时的或时变的行为的问题是很难解析地解出的. 蒙特卡罗模拟是有效地解决这一类问题的一般的建模技术. 蒙特卡罗模拟软件开发是耗时间的，为了提高精确度需要多次模拟，灵敏性分析可能变得出奇的费时间. 尽管如此，蒙特卡罗模拟模型仍然享有非常广泛的声誉. 模型很直观且易于解释，同时也是对许多复杂的随机系统进行建模的仅有的方法. 蒙特卡罗模拟模型的随机行为. 它是基于诸如抛硬币或掷骰子这类简单的随机化处理的办法，但通常使用了计算机的伪随机数发生器. 由于包含有随机元素，模型的每次重复将产生不同的结果.

例 9.1　你的假期来到了，但当地的气象预报告诉你这一周每天有 50%的可能下雨. 连续三天下雨的可能性有多大?

313

我们将使用五步方法. 第一步是提出问题. 在这个过程中我们选定一些重要的量为变量，同时明确我们关于这些变量的假设. 步骤一的结果列于图 9-1.

变量:

$$X_t - \begin{cases} 0 & \text{第 } t \text{ 天没下雨} \\ 1 & \text{在第 } t \text{ 天下雨} \end{cases}$$

假设:

X_1，X_2，…，X_y 是独立的

$\Pr\{X_t=0\}=\Pr\{X_t=1\}=1/2$

目标: 确定对于 $t=1$，2，3，4 或 5，$X_t - X_{t+1} = X_{t+2} = 1$ 的概率

图 9-1　雨天问题的步骤一的结果

314

步骤二是选择建模的方法. 我们将使用蒙特卡罗模拟的方法.

蒙特卡罗模拟是可以应用于任何概率模型的技术. 一个概率模型包含有若干随机变量同时需要明确每一个随机变量的概率分布. 蒙特卡罗模拟使用随机化的设备按照它们的概率分布给出每个随机变量的值. 因为模拟的结果依赖于随机因素，接连重复同样的模拟将会产生不同的结果. 通常，一个蒙特卡罗模拟将被重

复若干次以便于确定平均数或期望的结果.

蒙特卡罗模拟通常被用于估计系统的性能的一个或多个系统表现的度量值(MOPs). 重复的模拟可以被看作是独立的随机试验. 现在让我们考虑仅仅有一个模拟参数 Y 被检验的情况. 重复模拟的结果得到 Y_1, Y_2, …, Y_n, 这些都可以看作是独立同分布的随机变量, 它们的分布是未知的. 根据强大数定律我们知道, 当 $n\to\infty$ 时

$$\frac{Y_1+\cdots+Y_n}{n}\to EY \tag{1}$$

因此, 我们可以使用 Y_1, Y_2, …, Y_n 的平均数来估计 Y 的真实的期望值. 令

$$S_n=Y_1+\cdots+Y_n,$$

由中心极限定理可知, 当 n 足够大时

$$\frac{(S_n-n\mu)}{\sigma\sqrt{n}}$$

近似于标准正态分布, 其中 $\mu=EY$, $\sigma^2=VY$. 在大多数情形下, 当 $n\geqslant 10$ 时, 正态近似得相当好. 即使我们不知道 μ 或 σ, 中心极限定理仍然给予我们一些重要的认识. 观测的平均 S_n/n 与真实的均值 $\mu=EY$ 之差

$$\frac{S_n}{n}-\mu=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\left(\frac{S_n-n\mu}{\sigma\sqrt{n}}\right), \tag{2}$$

于是, 我们能够期望观测平均趋于零的变化的速度与 $1/\sqrt{n}$ 一样快. 换句话说, 要使 EY 的精确度增加一位小数就需要重复多模拟 100 次之多. 更精细的统计分析是可能的, 但是现在基本的想法是清楚的. 如果我们要使用蒙特卡罗模拟, 我们必须要满足于平均性质的相当粗放的估计.

作为一个实际的问题, 有许多可能引起误差和建模问题中的变化, 由蒙特卡罗模拟产生的额外的变化并不特别严重. 明智地应用灵敏性分析完全可以保证模拟结果的适当使用.

转到第三步, 现在我们需要组建模型, 图 9-2 给出了我们的假期问题的蒙特卡罗模拟的算法. 与第 3 章一样, 记法 Random{S}表示从集合 S 中随机地选择一个点. 在我们的模拟中, 每一天的天气将使用区间[0, 1]中的随机数表示. 如果这个数选出来是小于 p 的, 我们假设这是一个雨天. 否则, 就是一个晴天. 则, p 就是任何一天下雨的概率. 变量 C 简单地记数了连续雨天的天数. 图 9-3 显示了稍作修改的算法. 修改的部分是将蒙特卡罗模拟重复进行 n 次同时记数了下雨周的数目(即, 连续下三天雨的那些周的数目). 记号

315

$$Y\leftarrow \text{Rainy Day Simulation}(p)$$

表示我们运行图 9-2 的雨天模拟算法, 当输入参数为 p 时得到的输出变量 Y.

```
算法: 雨天模拟
变量:
    P=一个雨天的概率
    X(t)= {1, 在第 t 天下雨
          {0, 第 t 天不下雨
    Y= {1, ≥3 个连续的雨天
       {0, <3 个连续的雨天
输入: p
过程:
    Begin
    Y←0
    C←0
    for t=1 to 7 do
      Begin
    if Random{[0, 1]}<p then
        X(t)=1
      else
        X(t)=0
    if X(t)=1 then
        C←C+1
    else
        C←0
    if C≥3 then Y←1
        End
    End
输出: Y
```

图 9-2 雨天问题的蒙特卡罗模拟的伪代码

```
算法: 重复雨天模拟
变量: p=一个雨天的概率
      n=模拟的周数
      S=下雨周的数目
输入: p, n
过程:
      Begin
      S←0
      for k=1 to n do
        Begin
        Y ←Rainy Day Simulation(p)
        S←S+Y
      End
输出: S
```

图 9-3 雨天问题中重复进行蒙特卡罗模拟以确定平均特征的伪代码

步骤四是求解问题．我们在计算机上运行图 9-3 所示的算法，令参数 $p=0.5$，$n=100$．模拟的结果是 100 次中有 43 个下雨的周．在这个基础上我们估计出现下雨周的机会是 43%．可以做若干次模拟以确认这个结果．在每一次模拟中结果大约是每 100 次有 40 个下雨周．给出以 50%来估计下雨的可能时误差的大小，这大约就是这个问题中我们所需要的精确度．关于我们的模拟结果对随机因子的灵敏性的更多的细节将在稍后我们进行灵敏性分析时再讨论．

[316]

最后进行步骤五．你的假期来了，但是你发现当地的气象台预报一周内每天有 50%的可能下雨．模拟结果显示，如果这个预报是正确的，则这里只有 40%的可能在这一周将至少连续三天下雨．这个结果应用于晴天和雨天的结果是一样的，于是最后可以稍微乐观地注意到，让我们指出这一周每天有 50%的机会是晴天，同时有 40%的机会有至少三个连续的晴天．享用你的假期吧！

我们将通过检验模拟结果对于随机因素的灵敏性来开始我们的灵敏性分析．每个模型运行模拟了 $n=100$ 次假期周同时记下了下雨周的数目．使用步骤二的术语，我们的系统性能的度量值(MOP)是 Y，其中 $Y=1$ 意味着一个下雨周，$Y=0$ 表示相反的方面．我们的模型模拟了 $n=100$ 个独立的随机变量 Y_1，Y_2，…，Y_n，它们都有与 Y 相同的分布．这里 $Y_k=1$ 表明第 k 周是下雨周，$Y_k=0$ 则表示相反．我们的模型输出了随机变量 $S_n=Y_1+Y_2+\cdots+Y_n$，它表示下雨周的数目．令

[317]

$$q=\Pr\{Y=1\} \tag{3}$$

表示下雨周的概率．不难算出

$$\begin{aligned}\mu &= EY = q \\ \sigma^2 &= VY = q(1-q).\end{aligned} \tag{4}$$

运行第一个模型得到 $S_n=43$．以此为基础，我们可以使用强大数定律(1)去估计

$$q=EY\approx\frac{S_n}{n}=0.43. \tag{5}$$

这个估计值有多好呢？使用中心极限定理，从(2)式可知 S_n/n 与 $\mu=q$ 之差不太可能大于 $2\sigma/\sqrt{n}$，因为有 95%的把握确信标准正态随机变量的绝对值小于 2．使用式(4)和式(5)，我们能够得到式(5)中的估计值应在 q 的真实值的

$$2\sqrt{\frac{(0.43)(0.57)}{100}}\approx 0.1 \tag{6}$$

的范围之内．

更加初等的方式去研究我们的模拟结果对于随机因素的灵敏性是比较我们的模型多次运行的结果．图 9-4 给出了运行 40 次模型的结果，每一次模拟 100 个假期周．所有这些结果得到了估计值 $S_n/n\approx 0.4$，同时没有结果落在区间 0.4 ± 0.1 之外．同时可以看到 S_n 的分布近似于正态的．

[318]

我们同样能够检验我们的模拟结果对于预报的 50%下雨的可能性的灵敏性．图 9-5 给出了对于每天降雨的概率 $p=0.3$，0.4，0.5，0.6 和 0.7 的每一种情况

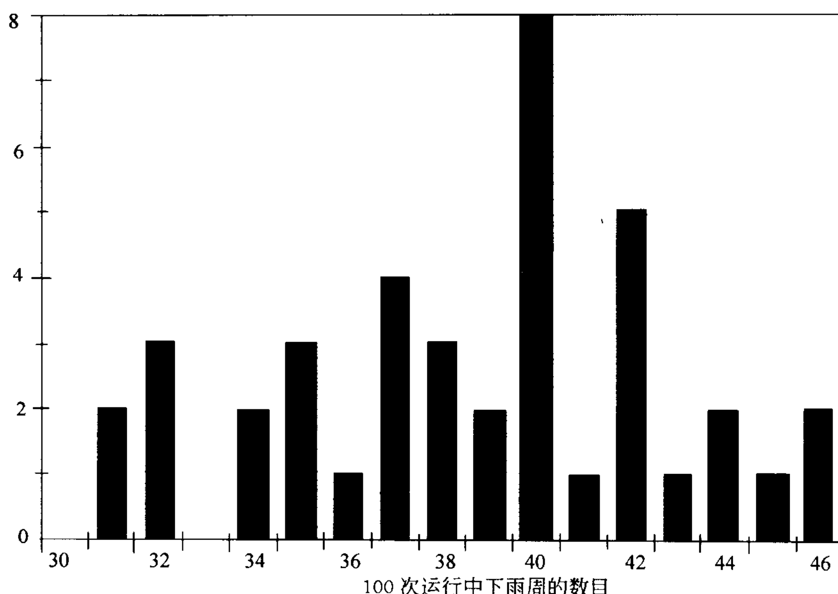


图 9-4 对于下雨天的问题表示100次运行中下雨周的数目的分布的直方图

运行10次模型的结果. 图中显示了平均结果(下雨周的百分率), 竖短线表示在每种情形下结果的范围. 对于每天降雨概率为40%时一周内至少连续三天下雨的概率大约是20%, 等等. 当连续三天下雨的概率变化相当小的时候, 似乎可以放心地说如果每天下雨的可能性适中时, 一周内连续三个雨天的可能性也会是如此.

稳健性如何? 我们将检验在构造模型时所作的严格的假设. 在步骤一我们假设指标变量 X_1, …, X_7 是独立同分布的. 换句话说, 每一天降雨的可能是相同的, 同时一天的天气是独立于任何另外一天的天气. 现假设 $\Pr\{X_t=1\}$ 随着 t 而变化, 我们仍然保持独立性的假设. 可以使用我们的灵敏性分析的结果得到连续三个雨天的概率的上界和下界, 理由是这个概率应该是随着任何的 $\Pr\{X_t=1\}$ 的增加而单调增加的. 提高的第 t 天的降雨的可能性就意味着提高了连续三天雨天的概率. 于是, 如果全部 $\Pr\{X_t=1\}$ 都在0.4和0.6之间(40%到60%的降雨的可能性), 三天降雨的概率就在0.2和0.6之间. 我们的模型关于这一点是相当稳健的, 部分原因在于我们没有要求非常精确的答案. 319

现在假设 $\{X_t\}$ 是不独立的. 例如, 我们可以将 $\{X_t\}$ 看作为状态空间 $\{0, 1\}$ 上的马尔可夫链. 这就意味着今天下雨的可能性依赖于昨天的天气情况. 当地的天气预报很少包含对组建这样的模型有用的信息, 特别是状态转移的概率. 然而, 我们不可以推测, 同时使用灵敏性分析证明我们关于独立性假设是合理的. 我们这里问的这一类问题是使用稳定状态分析所不能回答的, 因为它牵涉到随机过程的时变或瞬时特性的问题. 这样的问题通常是很难解析地处理的, 甚至用高

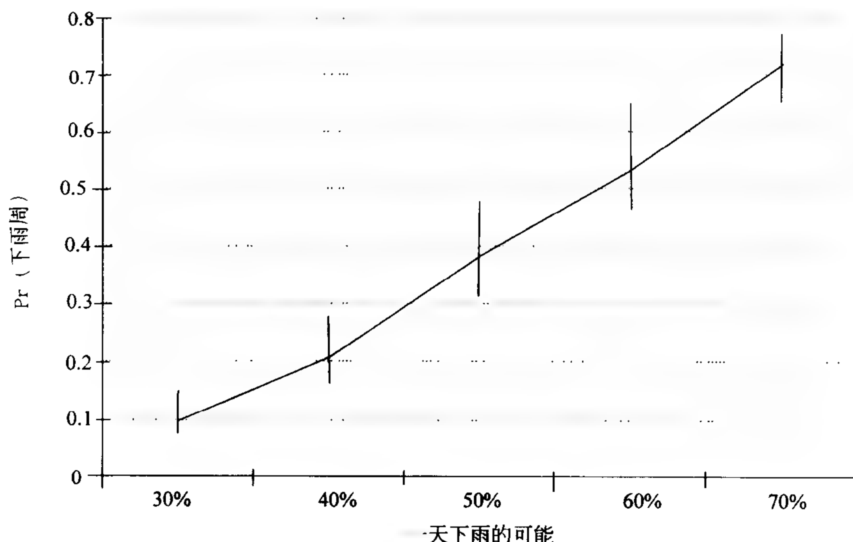


图 9-5　对于下雨天的问题下雨周的概率与一天下雨的可能性的关系

技术分析都是困难的．这就是蒙特卡罗模拟被如此广泛地应用的原因之一．

9.2　马尔可夫性质

如果一个随机过程当前的状态所包含的信息包括确定将来的状态的概率分布所需要的全部信息，则称该过程具有马尔可夫性．马尔可夫链和马尔可夫过程在第 8 章作了介绍．它们都具有马尔可夫性质．随机过程的蒙特卡罗模拟在马尔可夫性质面前非常简单，因为它减少了需要存储于计算机内的信息的数量．

320

例 9.2　我们再次考虑例 4.3 的太空船对接问题，现在要考虑到随机因素．我们的基本假设被总结在图 4-7 中．与前面一样，目标是确定我们的控制程序以成功地匹配速度．

将使用五步方法．我们的出发点是图 4-7，但是必须同样给出关于变量 a_n，c_n 和 w_n 的假设．理想地说我们需要进行实验并收集关于宇航员的响应时间和阅读或操作控制器所需要的时间等因素的数据资料．在没有这些资料时我们应致力于作一些合理的与已知的类似情形相一致的假设．

表示最具不确定性的随机变量(即最大的方差)是 c_n，用于控制调整的时间．这个变量表示用于观测接近的速度，计算加速调整和完成调整的时间．我们将假设需要大约 1 秒去观测接近的速度，2 秒去计算调整，2 秒进行调整．完成每个阶段的实际时间是随机的．令 R_n 表示读出接近速度的时间，S_n 表示计算调整的时间，T_n 表示进行调整的时间．则 $ER_n=1$ 秒，$ES_n=ET_n=2$ 秒．关于三个随机变量的分布我们需要做一个合理的假设．一个似乎合理的假设是它们都是非负的，相互独立的，同时结果最有可能接近于平均数．这里有各种各样的(无穷

多!)分布适合于这个一般的描述，到现在为止我们没有特殊的理由对一个的偏爱超过另一个．因此，现在我们将不指定确切的分布．我们的随机变量之一是 $c_n = R_n + S_n + T_n$．另一些是在下一次控制调整之前的等待时间 w_n，和这次调整之后的加速度 a_n．我们将假设 $a_n = -kv_n + \varepsilon_n$，其中 ε_n 是一个(小的)随机误差．我们将假设 ε_n 服从零均值的正态分布．ε_n 的方差依赖于操作人员的熟练程度和控制机械的灵敏程度．我们将假设一般能够达到大约 ± 0.05 米/秒^2 的精确度，于是假设 ε_n 的标准差为 $\sigma = 0.05$．如果我们打算使控制调整之间的全部时间保持固定为 15 秒，则等待时间 w_n 将依赖于 c_n．我们将假设 $w_n = 15 - c_n + E_n$，其中 E_n 是一个小的随机误差．假设是零均值且是正态的，同时宇航员响应时间的限制包含着有 0.1 秒的标准差．

321

我们现在考虑解析的目标．希望确定我们的控制程序是成功的．我们特别注意到 $v_n \to 0$．模拟能够确定这一点．我们同样有机会收集到系统性能的其他方面的信息．作为步骤一的一部分，现在我们需要跟踪选择哪一些性能的度量(MOP)，所选择的 MOP 应该提供用于计算控制程序选择作比较标准的那些重要的定量信息．假设我们的初始接近的速度是 50 米/秒，速度匹配的过程是连续变化的，接近的速度每秒减少至 0.1 米．我们关心取得成功的全部时间．它将是我们的 MOP．此时结束步骤一，我们将它总结于图 9-6．

变量：

t_n = 第 n 次速度观测的时间(秒)

v_n = 在时间 t_n 的速度(米/秒)

c_n = 进行第 n 次速度调整的时间(秒)

a_n = 第 n 次速度调整后的加速度(米/秒^2)

w_n = 第$(n+1)$次观测前的等待时间(秒)

R_n = 读速度的时间(秒)

S_n = 计算调整的时间(秒)

T_n = 进行调整的时间(秒)

ε_n = 控制调整的随机误差(米/秒^2)

E_n = 等待时间的随机误差(秒)

假设：

$t_{n+1} = t_n + c_n + w_n$

$v_{n+1} = v_n + a_{n-1}c_n + a_n w_n$

$a_n = -kv_n + \varepsilon_n$

$c_n = R_n + S_n + T_n$

$w_n = 15 - c_n + E_n$

$v_0 = 50$，$t_0 = 0$

$ER_n = 1$，$ES_n = ET_n = 2$，且

R_n，S_n，T_n 的分布已经被给出了

ε_n 是 0 均值，0.05 标准差的正态分布

E_n 是 0 均值，0.1 标准差的正态分布

目标： 确定 $T = \min\{t_n : |v_n| \leqslant 0.1\}$

图 9-6　具有随机因素的对接问题的步骤一的结果

步骤二是选择建模的方法．我们将使用基于马尔可夫性质的蒙特卡罗模拟方法．

一般的想法如下．在每个时间步长 n 存在一个向量 X_n，它描述了系统当前的状态．随机向量的序列$\{X_n\}$具有马尔可夫性质．换句话说，当前的状态 X_n 包含着所有的确定下一个状态 X_{n+1}的概率分布的信息．

模拟的一般的结构如下．首先，我们初始化变量同时读取数据资料的文件．在这个阶段我们必须给出初始状态 X_0．下一步，我们进入循环一直重复到一个终止条件被满足．在循环当中，我们使用 X_n 得到 X_{n+1}的分布，然后使用随机数发生器按照这个分布确定 X_{n+1}．我们同样必须计算和存储得到模拟 MOPs 所必需的所有的信息．一旦终止条件出现了，我们就退出循环同时输出 MOPs．这样我们就完成了．这个模拟的算法被列于图 9-7．我们必须对内循环进行详细的讨论．现在假设状态向量 X_n 是一维的．令

$$F_\Theta(t) = \Pr\{X_{n+1} \leqslant t \mid X_n = \Theta\}.$$

$\Theta = X_n$ 的数值确定了 X_{n+1}的概率分布．函数 F_Θ 将状态空间

$$E \subseteq \mathbb{R}$$

映射到区间[0，1]．可以用多种多样的方法产生[0，1]上的随机数，同时可以用来产生具有分布 F_Θ 的随机变量．因为

$$y = F_\Theta(x)$$

322～323

给出映射

$$E \to [0,1],$$

反函数

$$x = F_\Theta^{-1}(y)$$

给出映射

$$[0,1] \to E.$$

如果 U 是[0，1]上均匀分布的随机变量(即，U 的分布函数是在[0，1]上等于 1，其他处为 0 的函数)．则 $X_{n+1} = F_\Theta^{-1}(U)$将有分布 F_Θ，因为由于 $X_n = \Theta$，

$$\begin{aligned}\Pr\{X_{n+1} \leqslant t\} &= \Pr\{F_\Theta^{-1}(U) \leqslant t\} \\ &= \Pr\{U \leqslant F_\Theta(t)\} \\ &= F_\Theta(t)\end{aligned} \tag{7}$$

因为

$$\Pr\{U \leqslant x\} = x \text{ for } 0 \leqslant x \leqslant 1.$$

```
Begin
Read data
Initialize X0
While(not done) do
  Begin
  Determine distribution of Xn+1 using Xn
  Use Monte Carlo method to determine Xn+1
  Update records for MOPs
  End
Calculate and output MOPs
End
```

图 9-7　一般的马尔可夫模拟算法

例 9.3　令$\{X_n\}$表示一个随机过程，其中 X_{n+1}服从速率参数为 X_n 的指数分布．假设 $X_0=1$，确定首次通过时间

$$T=\min\{n:X_1+\cdots+X_n\geqslant 100\},$$

一旦我们讨论从 X_n 生成 X_{n+1}的细节，我们就可以使用计算机模拟去解决这个问题．令 $\Theta=X_n$，X_{n+1}的密度函数是对于 $x\geqslant 0$

$$f_\Theta(x)=\Theta e^{\Theta x}$$

分布函数是

$$F_\Theta(x)=1-e^{\Theta x}.$$

令

324

$$y=F_\Theta(x)=1-e^{\Theta x}$$

求反函数得到

$$x=F_\Theta^{-1}(y)=\frac{-\ln(1-y)}{\Theta}.$$

因此我们可以令

$$X_{n+1}=\frac{-\ln(1-U)}{\Theta},$$

其中 U 是 0 与 1 之间的随机数．图 9-8 给出了完整的模拟算法．

```
算法：首次通过时间模拟(例 9.3)
变量：X=初始状态
      N=首次通过时间
输入：X
过程：Begin
      S←0
      N←0
      until(S≥100)do
        Begin
        U←Random {[0, 1]}
        R←X
        X←-ln(1-U)/R
        S←S+X
        N←N+1
        End
      End
输出：N
```

图 9-8　例 9.3 马尔可夫模拟的伪代码

325

前面的讨论给出了根据指定的分布生成随机变量的方法．虽然在理论上是有用的，但在实践上有时有些麻烦．有许多分布，诸如正态分布那样，很难计算它的反函数 F_{θ}^{-1}．我们总可以通过从函数值表插值绕过这个困难，但是在正态分布的情形下还有更容易的方式．

中心极限定理保证了任何的具有均值 μ 和方差 σ^2 的独立、同分布的随机变量序列 $\{X_n\}$，标准化的部分和

$$\frac{((X_1+\cdots+X_n)-n\mu)}{\sigma\sqrt{n}}$$

趋向于标准正态分布．假设 $\{X_n\}$ 是 $[0，1]$ 上均匀的．则

$$\mu=\int_0^1 x\cdot dx=\frac{1}{2}$$
$$\sigma^2=\int_0^1\left(x-\frac{1}{2}\right)^2 dx=\frac{1}{12}, \tag{8}$$

同时当 n 充分大时，随机变量

$$Z=\frac{(X_1+\cdots+X_n)-\frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \tag{9}$$

近似于标准正态分布．在许多情形下，$n\geqslant 10$ 就足够了．我们将取 $n=12$ 以便消掉(9)式中的分母．给定标准正态随机变量 Z，其他的均值 μ 和标准差 σ 的正态随机变量可以由下式得到

$$Y=\mu+\sigma Z. \tag{10}$$

326 图 9-9 给出了生成具有给定的均值和方差的正态随机变量的简单的算法．

```
算法：正态随机变量
变量：μ=均值
      σ=标准差
      Y—具有均值 μ 和标准差 σ 的正态随机变量
输入：μ，σ
过程：
      Begin
      S←0
      for n =1 to 12 do
          Begin
          S←S+Random{[0，1]}
          End
      Z←S−6
      Y←μ+σZ
      End
输出：Y
```

图 9-9　正态随机变量蒙特卡罗模拟的伪代码

回到对接的问题，我们开始步骤三. 首先要关心的是确定我们的状态变量. 在这个情况下我们可以取

$$
\begin{aligned}
T &= t_n \\
V &= v_n \\
A &= a_n \\
B &= a_{n-1}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

作为我们的状态变量. 以前的 MOP 已经是一个状态变量，为了这个目的我们不需要初始化或者更新任何附加的变量. 图 9-10 给出了我们的对接问题模拟的算法. 记法 Normal(μ, σ)表示图 9-9 描述的算法给出的正态随机变量的输出. 现在我们将假设

327

$$c_n = R_n + S_n + T_n$$

服从均值为 $\mu=5$ 秒，标准差为 $\sigma=1$ 秒的正态分布.

```
算法: 对接模拟
变量: k=控制参数
      n=控制调整次数
      T(n)=时间(秒)
      V(n)=当前的速度(英尺/秒)
      A(n)=当前的加速度(英尺/秒²)
      B(n)=先前的加速度(英尺/秒²)
输入: T(0), V(0), A(0), B(0), k
过程:
      Begin
      n←0
      while |V(n)| >0.1 do
        Begin
        c←Normal(5. 1)
        B(n)←A(n)
        A(n)←Normal (-kV(n), 0.05)
        w←Normal (15-c, 0.1)
        T(n)←T(n)+c+w
        V(n)←V(n)+cB(n)+wA(n)
        n←n+1
        End
      End
输出: T(n)
```

图 9-10 对接问题蒙特卡罗模拟的伪代码

图 9-11 显示了 20 次模拟运行的结果. 在这些运行当中对接时间的范围在 156 秒和 604 秒之间，平均对接时间是 305 秒.

我们进行了一次关于宇宙飞船对接速度匹配的蒙特卡罗模拟. 我们的模拟考虑了在人机系统中固有的随机因素. 根据我们认为对操作性能所做的合理假设，模型确定了一个完成对接过程的宽松的时间变化范围，例如，初始相对速度为

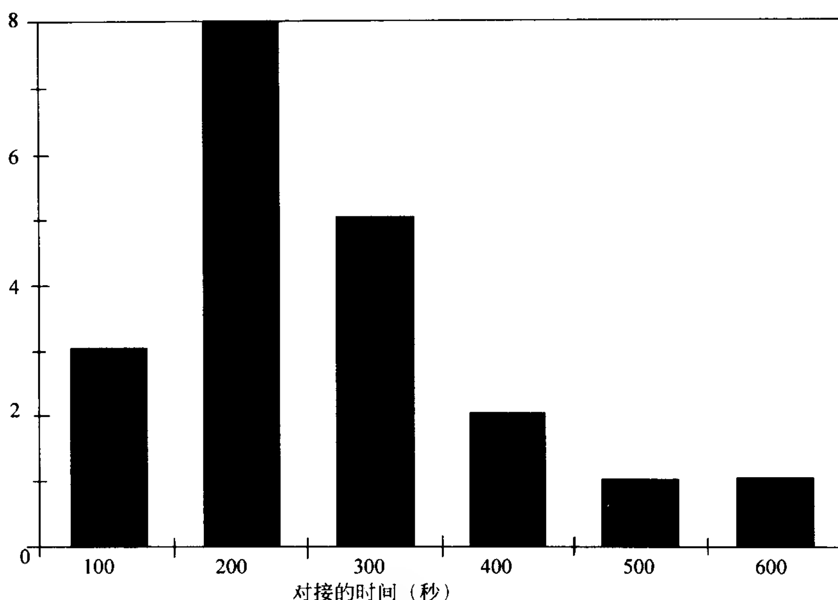


图 9-11 对于对接问题对接时间分布的直方图，$k=0.02$，$\sigma=0.1$

50 米/秒，用1∶50的控制系数，平均需 5 分钟．但是小于 3 分钟或大于 7 分钟的结果也经常出现，主要原因是飞行员完成控制调整过程的时间．

灵敏性分析的一个重要参数是完成控制调整所需时间 c_n 的标准差，我们假设 c_n 的标准差为$\sigma=1$，对于接近于 1 的 σ 值运行了 20 次模型，图 9-12 显示了运行结果．像图 9-5 那样，竖线表示结果的范围，图形表示对每个值 σ 的平均输出．可以看出我们全部的结论对于 σ 值的精确度相当灵敏．在每一个情形下平均对接时间都在 300 秒(5 分钟)左右，同时对接时间的变化相当大．

很可能灵敏性分析的最重要的参数是控制参数 k．我们假设 $k=0.02$，它导致了一个大约为 300 秒的平均对接时间．图 9-13 显示了当我们改变 k 值时运行若干次模型的结果．对于每个新的 k 值运行模型 20 次．与前面一样，竖线表示结果的范围，同时图形对于每个 k 的平均结果．正如我们所期望的，对接时间关于控制参数 k 相当地灵敏．因此，求出最优的 k 值是非常重要的．我们将把这个问题留作习题．

328～329

这个模型的主要的稳健性问题是 c_n 的分布，这里我们假设它是正态的．前面对于 σ 的小的变化我们的结果的改变是不明显的，同时我们也没有过分苛求它的精确性，我们有足够的理由期望模型关于 c_n 的分布表现出稳健性．这里有几个简单的试验可以验证它们自身所反映的稳健性，我们把这些留作习题．

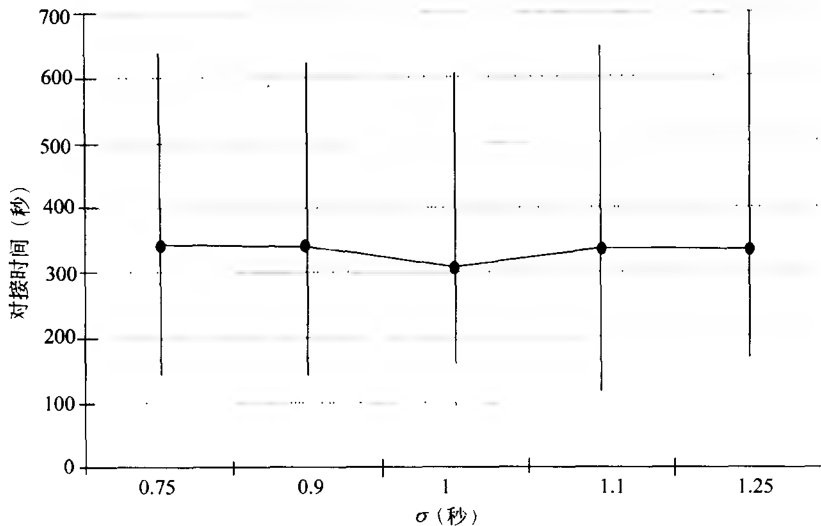


图 9 12　对于对接问题，对接时间与第 n 次控制调整时间的标准差的图像

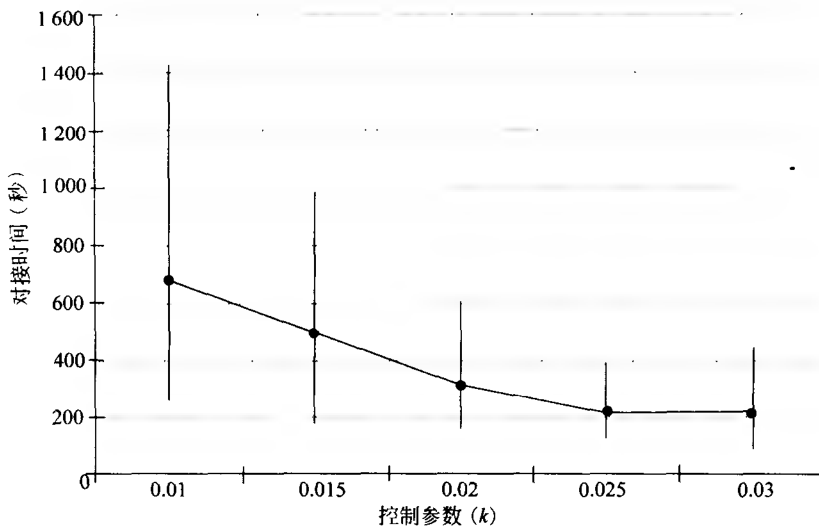


图 9-13　对于对接问题，对接时间与控制参数 k 的图像

9.3　解析模拟

蒙特卡罗模拟模型相对来说容易实现，而且直观诱人．它的主要缺点是需要进行多次的运行模型以得到可信的结果，特别是在灵敏性分析的领域．解析模拟的实现更加困难，但是推算更加有效．

例 9.4 一个军事行动的指挥官计划对敌方一个有很好的防卫的目标实行空中打击．高空战略轰炸机将被用于攻击这个重要的目标．在战斗的初期确保这一攻击的成功是非常重要的，特别是在战斗的第一天．每一架轰炸机有 0.5 的概率摧毁目标，假设它能够穿过空中防线且捕获(即发现)目标．一架轰炸机发现目标的概率是 0.9．目标由两个地对空导弹(SAM)阵地和若干防空火炮保护．飞机的飞行方式使得它们有效地避开了防空火炮(因为飞机很高)．每一个 SAM 阵地有它自己的跟踪雷达和计算机指挥设备，它能够跟踪两架飞机，和同时操纵两枚导弹．情报估计一枚导弹有 0.6 的概率摧毁其目标飞行器．两个 SAM 阵地共用一个目标搜索雷达，雷达对于 50 英里以上的高空轰炸机非常有效．搜索雷达的有效范围是 15 英里．轰炸机以 500 英里/小时的速度在 5 英里的高空飞行，发起攻击需要在目标的上空盘旋一分钟．每一个 SAM 阵地每 30 秒可以发射一枚导弹，导弹以 1 000 英里/小时的速度飞行．要派出多少架轰炸机才能确保摧毁这个目标．

330～331

我们将使用五步方法．步骤一是形式化地陈述问题．我们希望知道要多少架飞机去完成这个任务．目的是摧毁目标，但是很清楚我们不可能要求 100%地保证成功．现在我们希望有 99%的把握摧毁目标．稍后我们将在这个数值上做灵敏性分析．假设 N 架飞机被派出执行这个任务．在它们完成攻击目标之前被空防击落的飞机的数目是随机变量．我们将用 X 表示这个随机变量．为了得到任务完成的概率 S 的表达式，我们将分成两个阶段进行．首先我们将得到给定在完成攻击目标的任务之前 $X=i$ 架飞机被击落时任务完成的概率 P_i．一旦我们得到 X 的概率分布，就可以算出

$$S=\sum_i P_i \Pr\{X=i\}. \tag{12}$$

如果 N 架飞机被派出同时 $X=i$ 在它们到达目标之前被击落，这时就有 $(N-i)$架攻击的飞机．如果 p 是一架攻击的飞机摧毁目标的概率，则$(1-p)$是一架攻击的飞机没有摧毁目标的概率．$(N-i)$架攻击的飞机没有摧毁目标的概率是

$$(1-p)^{N-i}.$$

于是，至少一架攻击的飞机成功地摧毁目标的概率是

$$P_i=1-(1-p)^{N-i}. \tag{13}$$

在飞往目标的途中在攻击之前暴露于空中防线的全部时间是

$$\frac{15\text{ 英里}}{500\text{ 英里}/\text{小时}}\cdot\frac{60\text{ 分钟}}{\text{小时}}=1.8\text{ 分钟}$$

同时再加上在目标上空盘旋的 1 分钟，一共是 2.8 分钟，在这段时间内每个 SAM 阵地可以发射 5 枚导弹．于是，攻击的飞机将暴露于总共 $m=10$ 枚导弹的射程之内．我们假设被击落的飞机的数量 X 将服从二项分布

332

$$\Pr\{X=i\}=\binom{m}{i}q^i(1-q)^{m-i}, \tag{14}$$

其中

$$\binom{m}{i}=\frac{m!}{i!(m-i)!} \tag{15}$$

是二项式系数.（式(14)的分布是 m 次试验成功的次数的解析的模型，其中 q 表示成功的概率. 更详细的参见习题 12.）现在，为了计算任务成功的概率 S，我们需要将式(13)和(14)代入式(12)中去. 我们的目的是要确定最小的 N 使得 $S>0.99$. 从而结束了步骤一. 图 9-14 总结了我们的结果.

变量：

N＝派出的轰炸机的数量
m＝发射的导弹的数量
p＝一架轰炸机能够摧毁目标的概率
q＝一枚导弹能够击落轰炸机的概率
X＝攻击之前被击落的轰炸机的数量
P_i＝给定 $X=i$ 完成任务的概率
S＝任务完成的最终概率

假设：

$p=(0.9)(0.5)$
$q=0.6$
$m=10$
$P_i=1-(1-P)^{N-i}$
$\Pr\{X=i\}=\binom{m}{i}q^i(1-q)^{m-i}$；$i=0, 1, 2, \cdots, m$
$S=\sum_{i=0}^{m}P_i\Pr\{X=i\}$

目标： 求最小的 N 使得 $S>0.99$

图 9-14　轰炸机问题的步骤一的结果

333

步骤二是选择我们的建模的方法. 我们将使用解析模拟模型. 在蒙特卡罗模拟中我们引入随机数以模拟事件，同时使用重复试验来估计概率和期望值. 在解析模拟中我们使用概率理论与计算机程序的组合去计算概率和期望值. 解析模拟在数学上更加精密，这是它有更高的效率的原因. 解析模拟的可行性依赖于问题的复杂性和建模者的能力. 许多高级熟练的分析家把蒙特卡罗模拟作为最后的手段，只有在他们不能得到合适的解析模型时才使用这个方法.

步骤三是公式化模型. 图 9-15 显示了轰炸机问题解析模拟的算法. 二项式的记法 (m, i, q) 表示了由式(14)和(15)定义的二项概率的值

```
算法：轰炸机问题
变量：N=派出的轰炸机的数量
      m—发射的导弹的数量
      p=一架轰炸机能够摧毁目标的概率
      q=一枚导弹能够击落轰炸机的概率
      S=任务完成的最终概率
输入：N，m，p，q
过程：
      Begin
      S←0
      for i=0 to m do
        Begin
        P←1-(1-p)^(N-i)
        B←Binomial(m，i，q)
        S←S+P·B
        End
      End
输出：S
```

334

图 9-15　轰炸机问题解析模拟的伪代码

步骤四是求解这个模型．我们使用计算机执行图 9-15 中给出的算法，输入

$$m = 10$$
$$p = (0.9)(0.5)$$
$$q = 0.6,$$

同时我们改变 N 得到图 9-16 所示的结果．最少需要 $N=15$ 架飞机才能保证有 99%的可能完成任务．步骤五是回答了需要把这个任务交给多少架飞机才能够有 99%的把握取得成功的问题．答案是 15．现在我们需要进行灵敏性分析来讨论一个更广泛的问题，即承担这个任务的轰炸机的最佳的数量是多少?

首先我们考虑成功的概率 $S=0.99$．这是我们虚构的一个数．图 9-17 显示了改变这个参数的影响．可以看到，虽然大于 10 到小于 20 之间的任何数都可以，但 $N=15$ 似乎是合理的决策．派出多于 20 架飞机将被过度地杀伤．

坏的天气将降低发现目标的概率，它是 $p=(0.9)(0.5)$的一个因子，如果发现目标的概率降低到 0.5，则 $p=0.25$，对于 $S>0.99$ 我们将需要至少 $N=23$ 架飞机．如果发现目标的概率是 0.3，则需要 $N=35$ 架飞机．发现目标的概率与完成任务所需的飞机的数量之间的全部的关系被表示在图 9-18 上．坏的天气时，

335

我们是不可能派飞机去执行这样的任务的．

这一类模型的一个应用是分析技术改进的潜在的效果．假设我们有一架轰炸机飞行速度 1 200 英里/小时，要求在目标上空盘旋的时间是 15 秒．飞机暴露在 SAM 的火炮下仅仅是一分钟，防空阵地能射出 $m=4$ 枚导弹．现在要在 99%的把握下完成任务需要 $N=11$ 架轰炸机．图 9-19 给出了派出的轰炸机的数量和完成任务的概率之间在基线的情况下(防空阵地发射 $m=10$ 枚导弹)和在先进概念

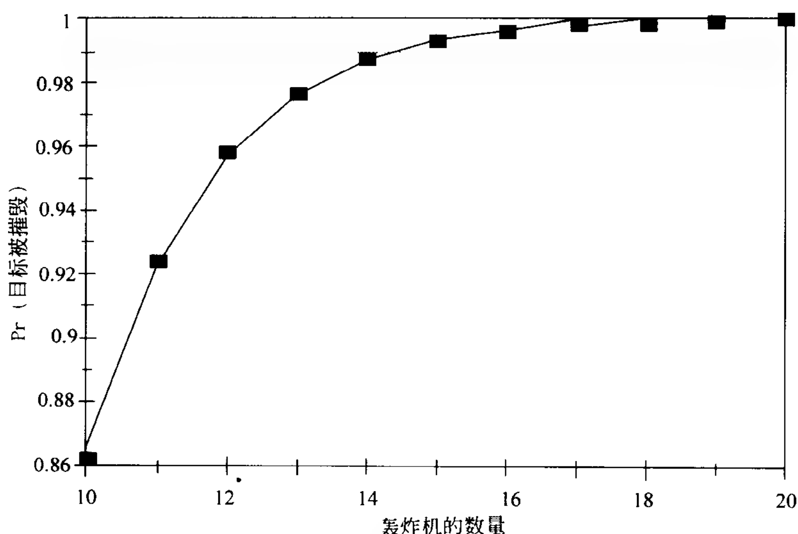


图 9-16　在轰炸机问题中任务完成的概率与派出的轰炸机的数量 N

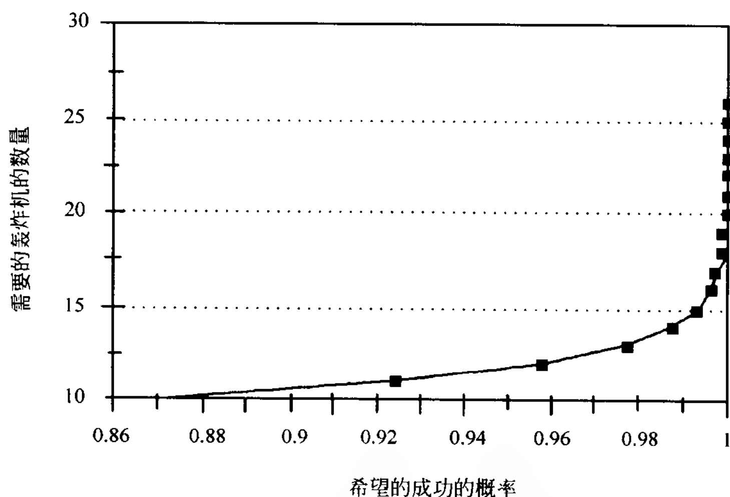


图 9-17　在轰炸机问题中为得到任务完成的概率需要的轰炸机的最小数量 N

336

下的飞机($m=4$)的关系．为了比较方便，我们同样引入了发射 $m=0$ 枚导弹的情况．这条曲线表示了所提出的技术的最大可能的收益．如果轰炸机没有受到防空阵地的威胁，仍然至少需要 8 架飞机才能在 99%的把握下成功．

假设我们能生产更好的目标识别系统，可以将一架飞机摧毁目标的概率增加到 0.8．现在 $p=(0.9)(0.8)=0.72$，所有其他的都维持不变，这时只要 $N=13$ 架飞机就可以达到 $S>0.99$．这还不是十分惊人的改进．如果我们把高速度的轰炸机与高精确度的炸弹组合在一起，我们就可以将所需飞机的数量调整到 8 架．

337

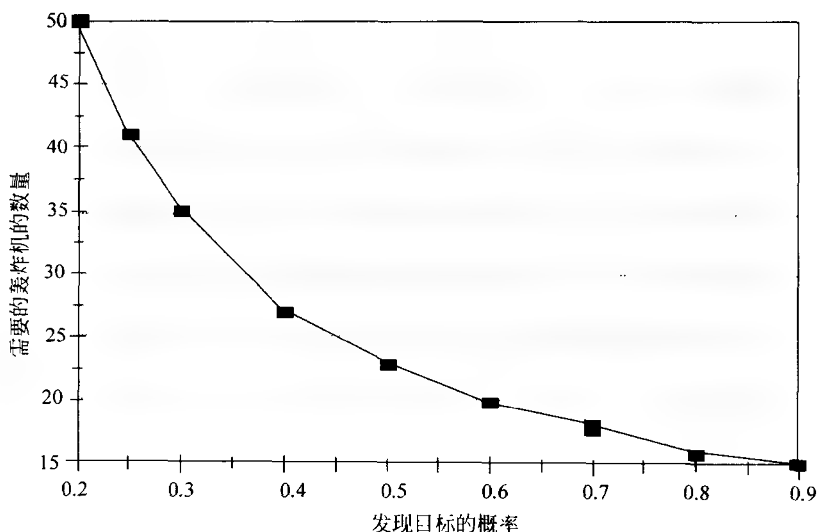


图 9-18　在轰炸机问题中轰炸机能够发现目标的概率与需要的轰炸机的最小数量 N

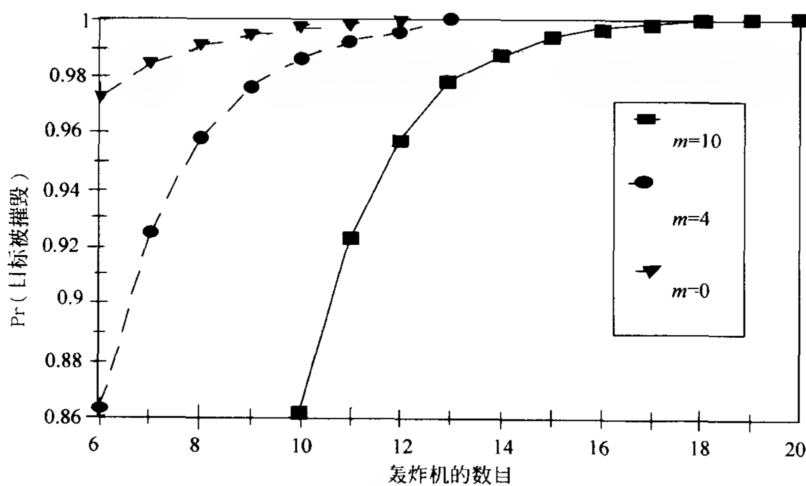


图 9-19　对于轰炸机问题任务完成的概率 S 与轰炸机的数量 N 的关系：导弹发射的数量 $m=0$，4，10 三种情况的比较

如果我们低估了敌人的空中防卫能力会怎样？如果 $q=0.8$，则需要 $N=17$ 架飞机才达到 $S>0.99$. 如果 $q=0.6$ 但 $m=15$(假设有 3 个 SAM 阵地)，则需要 18 架飞机. 在任何的情形下我们没有对一般的结论进行仔细的修正.

关于稳健性的问题，在模型中我们做了几个简化的假设. 我们假设每一架飞机独立地同时以相同的概率发现目标. 事实上，第一颗炸弹将生出烟尘，遮蔽目

标的区域. 这将降低其余的炸弹发现目标的概率. 我们已经做了关于这个参数的灵敏性的分析，N 对这个概率是相当灵敏的. 虽然我们的模型在这里不能够描绘出依赖性，它提供了一个界限. 如果每一架独立的飞机至少有 50%的可能发现目标，则 $N=23$ 架飞机将是足够的.

我们的模型同样假设了 SAM 阵地不会朝着同一架飞机射击两次. 这确实是多目标环境下当潜在的目标数量超过最大的射击次数时的最优的策略. 但是假设一项新的信息技术能够明显地减少被发现的飞机的数量. 这时空防系统就可能有比目标更多的射击次数. 假设空防系统能够告知是否有一架飞机被击落，于是他们将不会浪费任何的射击. 如果 d 架飞机被发现，则 m 次射击击落的飞机数可以用马尔可夫链模型来表示，其中

$$X_n \in \{0,1,\cdots,d\}$$

是 n 次射击后击中的飞机数. 状态转移概率是

$$\Pr\{X_{n+1}=i+1 \mid X_n=i\}=q \text{ and } \Pr\{X_{n+1}=i \mid X_n=i\}=1-q$$

对于 $0\leqslant i<d$，很自然

$$\Pr\{X_{n+1}=d \mid X_n=d\}=1.$$

如果 $X_0=0$，则 X_m 是对于每个 $d=1,\cdots,N$ 失掉的飞机的数量，将这些合并到我们的模型的修改版本中去. 这是一个应用马尔可夫链作瞬时分析的例子. 对于这个问题实现蒙特卡罗模拟也容易得多. 参见习题 14 和 15. 我们的解析模拟模型在这一点上是不很稳健的.　338

9.4　习题

1. 一个简单的碰运气的游戏是投掷硬币. 庄家投掷一枚硬币，在硬币落地前游戏者猜测硬币落地的状态. 如果硬币落地的状态与游戏着的猜测一致，庄家给游戏者 \$1；否则游戏者给庄家 \$1. 游戏者以 \$10 开始.
   (a)游戏者在他翻倍他的本钱之前破产的可能性是什么? 使用五步方法和蒙特卡罗模拟模型.
   (b)(a)中所描述的游戏平均要持续多长时间?
   (c)投掷 25 次硬币后游戏者平均还有多少钱?
2. 掷两颗骰子，总数为 7 出现的概率是 1/6.
   (a)在 100 次投掷中 5 次连续出现 7 的概率是多少? 使用五步方法和蒙特卡罗模拟模型.
   (b)掷骰子一直到出现 7 的平均次数是多少? 可使用任何的方法.
3. 再次考虑例 8.1 的存货问题. 在课文中我们提到了如果顾客到达之间的时间服从均值为 1 的指数分布，则一周内到达的顾客的人数是均值为 1 的泊松分布.
   (a)将蒙特卡罗模拟用于一周到达顾客数的模型. 假设到达者之间的时间服从

均值 1 的指数分布．模拟确定一周内到达的平均数．

(b)修改模拟的程序，跟踪模拟的若干周中有 0，1，2，3 或多于 3 个到达者的比例．与 8.1 节给出的泊松分布作比较．

4. (a)重复习题 3，但是现在假设顾客到达之间的时间是 0 和 2 周间的均匀分布．

(b)使用从你的计算机输出的概率去修正例 8.1 的马尔可夫链的转移概率．

(c)在均匀的顾客到达间隔时间的假设下求解关于稳态概率的方程 $\pi=\pi P$．

(d)在这个修改过的例子中求需求超过供给的稳态概率．

(e)将(d)的结果与 8.1 节的计算进行比较同时对原来的模型关于随机到达的假设的稳健性给出评论．

5. 再次考虑例 9.3 的对接问题，但是现在假设控制调整的时间服从 4 和 6 秒之间的均匀分布．

339

(a)修正图 9-10 的算法反映出在 c_n 的分布上的变化．

(b)在计算机上实现(a)的算法．

(c)对于 $k=0.02$ 作 20 次模拟，同时列出你的结果．估计平均对接时间．

(d)将(c)的结果与 9.2 节的结果作比较．你是否会说模型关于 c_n 是正态分布的假设是稳健的？

6. 再次考虑例 9.3 的对接问题．

(a)在计算机上实现图 9-10 的算法．作几次模型的模拟，与课文的结果作比较．

(b)改变参数 k 确定这个控制参数的最优值．对于每个 k 值，你将需要进行几次模拟以确定其平均特性．

(c)研究(b)中你的答案对于宇宙飞船的初始速度(我们假设是 50 米/秒)的灵敏性．

(d)研究(b)中你的答案对于对接阈值(我们假设是 0.1 英尺/秒)的灵敏性．

7. 再次考虑例 9.1 的雨天问题，但是现在假设如果今天是雨天，则明天有 75％的可能是雨天，同样地如果今天是晴天，则明天有 75％的可能是晴天．在假期我们到达的这一天是晴天($X_n=0$)．

(a)确定今后任何一天是雨天的稳定状态概率．模型$\{X_t\}$是马尔可夫链．

(b)使用蒙特卡罗模拟估计三个连续雨天的概率．

8. 再次考虑第 8 章习题 10 的细胞分裂问题．

(a)使用蒙特卡罗模拟去模拟细胞分裂的过程．要多少时间平均一个细胞增长到 100 个细胞？

(b)一个细胞将死于达到 100 细胞之前的概率是什么？

9. (继续第 7 章的习题 8)使用蒙特卡罗方法模拟一个随机到达的过程，到达速率是 5 分钟．确定在 $t=1$ 小时之前最后一个到达者与 $t=1$ 小时后下一个到达者之间的平均间隔时间．

10. (继续第 7 章的习题 9)模拟超市收款台排队的问题. 引入一个随机数表示你的服务时间，同时去看有多少随机数超过了这个数. 重复这个模拟许多次确定开始发现有超过你的随机数的平均个数. 解释你的答案与第 7 章习题 9(c)得到的答案之间的差异.

340

11. 再次考虑例 8.1 的存货问题，确定每周平均损失的销售量.

    (a)假设每天一个顾客到达的概率为 0.2. 以一天为时间步长作蒙特卡罗模拟一周的销售活动. 对于初始存货为一个、两个、或三个水族箱通过重复的模拟确定平均损失的销售量.

    (b)将(a)中的结果于 8.1 节计算的稳定状态概率结合起来确定每周全部平均损失的销售量.

12. 这个题说明了二项式模型. 假设考虑 m 个独立的随机试验，其中每一个试验成功的概率为 q. 令 $X_i=1$ 表示第 i 个试验成功，否则为 $X_i=0$. 则 $X=X_1+\cdots+X_m$ 表示成功试验的次数.

    (a)证明 $EX=mq$，$VX=mq(1-q)$. [提示：首先证明 $EX_i=q$ 和 $VX_i=q(1-q)$.]

    (b)解释为什么 $X=1$ 有 $\binom{m}{i}$ 中可能的发生方式，为什么每一种有概率 $q^i(1-q)^{m-i}$.

    (c)解释为什么课本中的(14)式给出了在 m 次试验中 I 次成功的概率.

13. 再次考虑例 9.4 的轰炸机的问题. 修改模型得出在这个任务期间损失的飞机数量的期望值. 还要考虑攻击以后当轰炸机离开目标区域时损失飞机的可能性.

    (a)如果派出 $N=15$ 架飞机，在任务期间平均损失多少架飞机?

    (b)关于 N 作灵敏性分析.

    (c)如果我们使用高级的轰炸机，飞行速度为 1 200 英里/小时，在目标上空只需盘旋 15 秒钟结果会怎样?

    (d)关于一枚导弹击落一架飞机的概率 q 作灵敏性分析. 考虑 $q=0.4$，0.5，0.6，0.7 和 0.8 的情形. 叙述你的一般的结论. 在什么样的环境下一个负责任的指挥官将会命令他的驾驶员去执行这个任务?

14. 再次考虑例 9.4 的轰炸机的问题. 假设先进的技术可以使得多数的轰炸机能够穿过空中防线而不被发现.

    (a)假设有 4 架飞机被发现了，令 Y 表示经历防空阵地 8 次射击而幸存的飞机的数量. 确定 Y 的概率分布，计算在完成攻击之前平均损失的飞机数. 基于马尔可夫链模型使用蒙特卡罗模拟像 9.3 节最后那样讨论.

341

    (b)重复(a)但是使用解析模拟的方法.

    (c)假设要求你将多个导弹射击一架飞机的可能性合并入例 9.3 的模型中.

对你来说有两个可能的选择．你可以写一个纯粹的解析模拟与(b)的结果结合起来，或者你可以使用(a)中的推广的蒙特卡罗模拟模型得到对于$d=1,\cdots,7$架飞机被发现时Y的概率分布，把这些结果作为资料合并到模型中．哪一个是你的选择？为什么？

15. (困难的问题)实现习题14(c)描述的模型的增强．
16. 再次考虑例9.4的轰炸机的问题．
    (a)如果派出$N=15$架飞机，使用蒙特卡罗模拟求出完成任务的概率．
    (b)关于N作灵敏性分析．对于$N=12$，15，18和21确定任务完成的近似概率．
    (c)从模型的组建和灵敏性分析的难度这两方面比较蒙特卡罗模拟和解析模拟的相对的优越性．
17. 再次考虑例9.4的轰炸机的问题．这个问题给出二项式

$$(a+b)^n=\sum_{i=0}^{n}\binom{n}{i}a^ib^{n-i}$$

如何被用于简化课文中提到的解析模拟模型．

(a)使用二项式得到下面的方程

$$S=1-(1-p)^{N-m}(q+(1-p)(1-q))^m.$$

(b)证明保证任务完成的概率S所需要的飞机的数量N是大于或等于

$$N=\frac{\log\left[\frac{(1-S)(1-p)^m}{(q+(1-p)(1-q))^m}\right]}{\log(1-p)}.$$

的最小的整数．

(c)使用这个公式验证图9-17中的灵敏性分析的结果．

18. 无线电通讯的频道20%的时间是激活的，80%的时间是空闲的．平均信息持续20秒．一个扫描传感器周期地监视着这个频道企图查出使用这个频道的发射器的位置．一个扫描仪工作的解析模拟模型被构成了．如果一次扫描时频道的状态(激活或空闲)被认为是独立于前一次扫描期间频道的状态至少是近似地正确的，这时它是一个非常简单的模型．使用2-状态马尔可夫过程作为频道的模型同时用解析模拟确定需要多长时间就达到了稳定状态．这个过程实质上就忘掉了初始的状态．

342

    (a)确定这个马尔可夫过程的稳定状态分布．
    (b)得出状态概率$P_t(i)=\Pr\{X_t=i\}$所满足的微分方程组．[参见8.2节]
    (c)如果$X_t=0$(频道空闲)需要多长时间状态的概率在稳定状态值的5%之内？
    (d)假设$X_t=1$(频道激活)重复(c)．
    (e)扫描间隔为多远的马尔可夫性质就可以(至少是近似的)应用于这个模型？

19. 这个问题提出一个使用解析模拟解决例 9.1 的雨天问题的途径.

(a)令 C_t 表示从第 t 天开始的连续下雨的天数. 证明$\{C_t\}$是马尔可夫链. 给出这个马尔可夫链的转移图和转移矩阵.

(b)我们关心 $\max\{C_1, \cdots, C_7\} \geq 3$ 的概率. 在(a)中通过限制状态空间仅仅是$\{0, 1, 2, 3\}$改变马尔可夫链模型. 改变状态转移概率使得状态 3 是个吸收状态，即令

$$\Pr\{C_{t+1} = 3 \mid C_t = 3\} = 1.$$

解释为什么这一周至少连续三天下雨与 $\Pr\{C_7 = 3 \mid C_0 = 0\}$相同.

(c)假设每天下雨的可能是 50%，使用第 8 章的方法计算一周内至少连续三天下雨的概率.

(d)关于 50% 的假设作灵敏性分析. 将你的结果与图 9-5 得到的结果作比较.

(e)将这个解析模拟与 9.1 节使用的蒙特卡罗模型作比较. 你喜欢哪一个，为什么？如果你现在刚刚遇到这个问题，你选择哪一个建模的方法？

9.5 进一步的阅读文献

Bratley, P., et al. (1983). *A Guide to Simulation*, Springer–Verlag, New York.

Hoffman, D. *Monte Carlo: The Use of Random Digits to Simulate Experiments*, UMAP module 269.

Meerschaert, M. and Cherry, W.P. (1988). Modeling the Behavior of a Scanning Radio Communications Sensor, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 35, 307–315.

Molloy, M. (1989). *Fundamentals of Performance Modeling*, Macmillan, New York.

Press, W., Flannery, B., Teukolsky, S., and Vetterling, W. (1987). *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, New York.

Rubenstein, R. (1981). *Simulation and the Monte Carlo Method*, Wiley, New York.

Shephard, R., Hartley, D., Haysman, P., Thorpe, L., and Bathe, M. (1988). *Applied Operations Research: Examples from Defense Assessment*, Plenum Press, London.

343 ~ 344

后　记

数学是解决问题的语言，是所有科学和技术的核心．接受数学教育的优点是使你可以自由地选择从事任何你能够想到的技术方面的事业．我们下面简要地介绍一些数学专业的学生可以从事的常见事业．我们也会对如何利用数学来解决实际中的问题从而在工作中获得成功给出一些建议．大多数学生所考虑的第一个问题是直接工作还是继续攻读更高一级的学位．我们就首先介绍数学专业的大学毕业生和硕士研究生可以选择的丰富的就业机会．

当前数学专业的学生的首选工作是计算机程序设计．预计对胜任的程序员的大量而且呈稳定增长的需求会持续相当一段时间．数学专业的学生比程序员的平均水平要好，雇主也知道这一点．为获得大多数入门水平的工作的资格，你所要做的就是完成三到四门计算机课程，包括一门数据结构课程、学会一种通用的编程语言，比如 C、FORTRAN 或 COBOL．通常不会要求有计算机的学位，这是因为没有足够的计算机专业的学生来满足空缺的工作需求．计算机程序设计是一种有很好销路的技能，它可以为你打开许多扇门．当你得到一份工作并证明你作为程序员的能力后，你会发现许多其他的机会会自己出现．

数学专业毕业生的另一个很好的工作是保险精算．保险精算公司经常会只根据其在学校中的成绩来聘用一位好的数学专业的学生，但如果你确实对保险精算有兴趣，一个很好的做法是在毕业之前通过保险精算的第一次考试(包括微积分和线性代数)．成为一个完全合格的保险精算师需要通过一系列的十次考试．保险精算学的一些研究生课程会帮助你准备这些考试，你也可以自学．如果你有能力并且不断自我训练提高，在十年或更少的时间内就可以达到这个非常有意思而且收入丰厚的行业的顶点．几乎每一家财富 500 强公司都至少有一位副总裁是保险精算师．在保险公司和独立的保险精算公司中都有很多的机会．保险精算师为这些公司做数学模型的工作．对那些对商业有强烈兴趣的人，这是一个非常好的途径，而且你不需要通过任何关于商业、经济或会计的课程．

很多学生选择将其数学学位与某个第二学位相结合，比如工程、计算机科学或会计学．这些专业的好学生得到一个很好的工作当然是不会有问题的．他或她可能遇到的一个问题就是这个工作在多大程度上会用到其全部的数学知识．坦率地讲，这有好的方面也有坏的方面．坏的方面是在工作的前一两年内，很少有机会用到许多在学校里学到的数学．每个人都要从某个地方开始，大多数人要从最底层开始．要记住的最重要的事是在工作中要投入能量、热情，处理问题精确．考察你这段时间的工作情况，可以来检验你是否已准备承担更复杂的工作．好的方面是一旦你通过了入门阶段，就会有大量的真正的机会来应用你的数学知识解决重要而有意思的问题．当然，你需要证明你能够处

理这一挑战.

现在我们来讨论那些希望攻读更高一级学位的数学专业毕业生的一些机会. 事实上在所有研究生培养计划中数学专业的学生都是很受欢迎的，特别是在科学和工程方面. 如果你关注一下在大多数的这些领域所做出的前沿工作，你就会发现它涉及了很多的数学. 在这里没有足够的篇幅来描述那些可能机会的惊人的多样性. 我们集中来讨论那些主要与解决实际问题的数学方向有关的领域.

在数学方面进一步的研究生教育对已经获得数学学位的人来说是一个很明显的选择. 如果你对解决实际问题有兴趣，你应该寻求那些在应用数学、统计或运筹学方面有培养计划的研究生院. 计算机科学是另一个有吸引力的选择，其原因我们已经在前面做了说明. 有很好的计算背景的聪明的数学专业学生会在计算机 [346] 科学研究生院中发现大量的机会来运用他们的数学技能. 毕业后，这些人会拥有强大的数学和计算机的综合技能，能够承担多种类型的引人入胜的实际问题. 统计是另一个很好的选择. 许多统计学家都是从获得一个数学学位开始的. 工作的机会有很多，其多样性也是超出大多数人的想像的. 数学模型的一些最有意思的工作就是由统计学家完成的.

运筹学是一个非常广泛的研究领域，它包括了我们通常认为的数学建模的很大一部分内容. 它包括最优化问题的研究、排队论、存储论. 拥有一个数学学位而进入到这一领域是可能的，但更好的是从一个运筹学领域的高级学位开始. 这里最大的问题是要找到正确的方向. 数学、统计、计算机科学、工程、甚至 MBA 通常都会提供一个这一领域的专业或方向. 选择你喜欢的任何一个，哪个系授予学位不会有太大的不同. 不同的学校对这一方向属于哪个系有不同的原则. 另一个使人迷惑的问题是这个方向的名称. 运筹学、运筹管理学、管理科学和系统科学都是不同的名称，但他们实质上是相同的. 再强调一次，在你的学位证上出现的是哪一个名称并没有太大关系.

如果你对科研和教学有兴趣，就要考虑一个博士计划. 一个数学博士是在学术中比较有市场的学位. 而应用数学的一些分支(如数值分析、偏微分方程)的博士则可以在工业的研究实验室中找到很好的工作. 如果你对学术工作有兴趣，你也可以考虑攻读统计、计算机科学或运筹学的博士学位. 你会发现所做的工作主要是数学，而且工作的市场会比较好，薪水也会比较高. 事实上，在科学和工程的几乎任何领域的博士培养计划都会提供丰富的机会来应用数学解 [347] 决实际问题. 你不要担心什么会限制你的想像力. 最后，不要忽视综合的博士学位的可能. 数学物理学、数学生物学、数学心理学和数学经济学都会给出特别的挑战. 你也会开始考虑是从事学术工作还是工业工作. 学术工作在生活方式上比较优越，而工业工作通常会获得双倍的收入. 你会希望站在一个选择的位置上.

进一步的阅读文献

Careers in Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, 3600 University City Science Center, Philadelphia PA 19104-2688, http://www.siam.org/.

Careers in Operations Research, Institute for Operations Research and the Management Sciences, PO Box 64794, Baltimore, MD 21264-4794, http://www.informs.org/.

Careers in Statistics, American Statistical Association, 1429 Duke St., Alexandria VA 22314-3402, http://www.amstat.org/.

Computer and Mathematics Related Occupations, Occupational Outlook Handbook, U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Publication Sales Center, PO Box 2145, Chicago IL 60690, http://stats.bls.gov/.

Mathematical Sciences Career Information, http://www.ams.org/careers/.

The Actuarial Profession, Society of Actuaries, 475 North Martingale Rd., Schaumburg IL 60173-2226, http://www.soa.org/.

101 *Careers in Mathematics*, edited by Andrew Sterrett, Mathematical Association of America, 1529 18th St. NW, Washington, DC 20036-1385, http://www.maa.org/.

348

索　引

索引中的页码为英文原书页码，与书中页边标注的页码一致。

A

analytic simulation(解析模拟) 330
area fire(区域火力) 192
attrition rate(伤亡率) 192

B

balance equations(平衡方程) 129，289
binary integer programming problem(二元整数规划) 111
binomial distribution(二项式分布) 332，338
binomial formula(二项式公式) 338
bombing run problem(弹道问题) 330，334，338
branch-and-bound(分支定界) 77

C

capacitor(电容器) 166
cargo problem(货运问题) 59，118
cell-division problem(细胞分裂问题) 308，340
center of mass(质心) 256
central limit theorem(中心极限定理) 260
chaos(混沌) 212，217
characteristic equation(特征方程) 159
checkout line problem(收款台排队问题) 267，340
color TV problem(彩电问题) 21，33，40，117，119，121
complete graph(完全图) 63
complex absolute value(复数绝对值) 163
computer algebra system(计算机代数系统) 25，66，305
conditional probability(条件概率) 256
constraints(限制) 34
continuous random variable(连续随机变量) 254
continuous-time simulation(连续时间模拟) 197
Cramer's rule(克莱姆法则) 130
current(电流) 167

D

decision variable(决策变量) 23
density function(密度函数) 255
dimension(维数) 217
diode problem(二级管问题) 249，252，253
direct fire(直接火力) 192
dirt problem(土方问题) 92，94，121
discrete random variable(离散随机变量) 249
discrete-time dynamic system(离散时间动力系统) 133
discrete-time simulation(离散时间模拟) 193
distribution function(分布函数) 255
docking problem(对接问题) 141，152，160，164，183，321，326，339
dynamic model(动态模型) 133
dynamic system(动力系统) 134

E

eigenvalue(特征值) 153
eigenvalue method(特征值方法) 153，160
eigenvector(特征向量) 155
electrical circuit(电回路) 166
equilibrium(平衡态) 129
ergodic Markov chain(遍历马尔可夫链) 278
ergodic Markov process(遍历马尔可夫过程) 289
Euler method(欧拉方法) 203
expected value(期望值) 254，255
exponential distribution(指数分布) 256
exponential random variable(指数随机变量) 321

F

facility location problem(消防站位置问题) 71, 116, 310
farm problem(农场问题) 83, 102
feasible region(可行域) 41
first passage time(首次通过时间) 319
five-step method(五步方法) 3, 22
forklift problem(铲车问题) 283
fractals(分形) 212, 217

G

geometric distribution(几何分布) 255
goodness of fit(拟合优度) 298
gradient vector(梯度向量) 36
graphical method(图像法) 69
grid search(格点搜索) 75

H

heart attack problem(心脏疾病问题) 267
home mortgage problem(家庭抵押贷款问题) 295, 309
homeomorphism(同胚) 169
house fire problem(房屋火灾问题) 259, 266

I

independent random variables(独立随机变量) 252
inductor(感应器) 166
infectious disease problem(传染病问题) 151, 234
integer programming(整数规划) 102
intrinsic growth rate(内禀增长律) 128
inventory problem(目录问题) 272, 304, 339, 341
iteration function(迭代函数) 160, 182

K

Kirchoff's current law(基尔霍夫电流律) 168
Kirchoff's voltage law(基尔霍夫电压律) 168

L

Lagrange multipliers(拉格朗日乘子) 32
Lanchester model(Lanchester 模型) 150
lawn chair problem(草坪椅问题) 77, 118
limit cycle(极限环) 207
linear approximation(线性逼近) 153, 163, 182
linear contraction(线性约束) 163
linear programming(线性规划) 83
linear regression(线性回归) 295

M

Markov chain(马尔可夫链) 272
Markov decision theory(马尔可夫判定定理) 283
Markov process(马尔可夫过程) 283, 306
Markov property(马尔可夫性质) 285, 320
memoryless property(无记忆性质) 257, 284
minimum viable population level(最小的有效种群水平) 137, 149, 184, 235
Monte Carlo simulation(蒙特卡罗模拟) 314
MOP(系统表现的度量值) 314, 317, 318
multiple regression(多元回归) 309
mutivariable chain rule(多变量函数的链式法则) 31, 48
multivariable constrained optimization(多变量约束最优化) 34
multivariable unconstrained optimization(多变量无约束最优化) 21
Murphy's Law(Murphy 法则) 267, 292

N

newspaper problem(报纸问题) 19, 57, 58, 118
Newton's method(牛顿方法) 67, 79
nonlinear programming(非线性规划) 83
normal random variable(正态随机变量) 326

O

objective function(目标函数) 36

one-variable optimization(单变量最优化)　3
outliers(远离点)　302

P

pendulum problem(钟摆问题)　239
phase portrait(相图)　169
pig problem(售猪问题)　3，9，10，61，81
Poisson distribution(泊松分布)　266，273
Poisson process(泊松过程)　258
polynomial least squares(多项式最小二乘法)　310
predator prey problem(捕食-被捕食问题)　150，186，236
price elasticity(价格弹性系数)　26
probability distribution(概率分布)　250

Q

queuing model (排队模型)　294

R

R squared statistic(R 平方统计量)　299
radioactive decay problem(放射衰变问题)　254，265
rainy day problem(雨天问题)　313，340，343
random arrivals(随机到达)　256
random search(随机搜寻)　72
random variable(随机变量)　314
range of normal variation(正常变化范围)　261
rate diagram(速率图)　286
resistor(电阻)　176
RLC circuit problem(RLC 电路问题)　178，187，204，212，238，239
robustness(稳健性)　14
Runge-Kutta method(龙格-库塔方法)　208

S

scanning sensor problem(扫描传感器问题)　268，342
self-similar(自相似)　217
sensitivity(灵敏性)　10，65
sensitivity analysis(灵敏性分析)　7
shadow price(影子价格)　51，53
simplex method(单纯形法)　85
slack variable(松弛变量)　85
spreadsheet(电子表格)　95，112，207
stable(稳定)　133，138
standard normal distribution(标准正态分布)　260
state space(状态空间)　129，134
state transition diagram(状态转移图)　274
state transition matrix(状态转移矩阵)　274
state transition probability(状态转移概率)　274
state variable(状态变量)　129，134
statistical inference(统计推断)　259
statistically significant(统计显著)　261
steady-state(稳定态，稳态)　129
steady-state distribution(稳态分布)　277
stock market problem(股市问题)　305
strange attractor(奇怪吸引子)　229
strong law of large numbers(强大数定律)　252，314
supply and demand problem(供需问题)　151，186

T

taxicab problem(出租车问题)　267，340
time delay(时滞)　141，147
time series model(时间序列模型)　304
tree problem(树木问题)　127，148，153，186，187，237

U

uniform distribution(均匀分布)　326

V

v-i characteristic(*v-i* 特征)　168
variance(方差)　260
vector field(速度场)　135
velocity vector(速度向量)　135
voltage(电压)　176

W

war problem（战争问题） 150，192，232，233

weather problem（天气问题） 222，243

whale problem（鲸鱼问题） 18，55，56，116，133，149，150，186，213，234，235，236，237，242，243

[General Information]

□□=□□□□□□□□□ □□□□□

□□=□□□□□□□□□□□ □□□ □□ □□□□

□□=256

SS□=11417458

DX□=

□□□□=2005□06□□1□

□□□=□□□□□□□

1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
2
2.1
2.2
2.3
2.4
2.5
3
3.1
3.2
3.3
3.4
3.5
3.6
4
4.1
4.2
4.3
4.4
4.5
5
5.1
5.2
5.3
5.4

5.5 □□□□□□□□
□6□ □□□□□□□
6.1 □□□□
6.2 □□□□□□
6.3 □□□□
6.4 □□□□□
6.5 □□
6.6 □□□□□□□□
□□□□ □□□□
□7□ □□□□□□
7.1 □□□□□□□□
7.2 □□□□□□□□
7.3 □□□□
7.4 □□
7.5 □□□□□□□□
□8□ □□□□
8.1 □□□□□
8.2 □□□□□□
8.3 □□□□
8.4 □□
8.5 □□□□□□□□
□9□ □□□□□□□
9.1 □□□□□□
9.2 □□□□□□
9.3 □□□□
9.4 □□
9.5 □□□□□□□□
□□
□□